



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

На правах рукописи

2000–52

Ажгирей Игорь Леонидович

**РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНОГО  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАСЧЕТОВ  
ЯДЕРНО–ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ  
КАСКАДОВ**

05.13.11 — математическое и программное обеспечение  
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук

Протвино 2000

УДК 539.1.07

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г.Протвино).

Научные руководители: доктор физико-математических наук Е.А. Козловский.

Официальные оппоненты: кандидат физико-математических наук С.Р. Слабоспицкий (ОЭФ, ИФВЭ), доктор физико-математических наук, профессор Л.Н. Смирнова (НИИЯФ МГУ).

Ведущая организация – Лаборатория информационных технологий (ОИЯИ, г. Дубна).

Защита диссертации состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2000 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета К 034.02.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142284, Протвино Московской обл.).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2000 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета К 034.02.01

В.Н.Ларин

© Государственный научный центр  
Российской Федерации  
Институт физики высоких энергий, 2000

## Общая характеристика работы

Высокие энергии, интенсивность и светимость действующих и проектируемых ускорителей заряженных частиц, сложность и большая стоимость современных экспериментальных установок и ускорительного оборудования выдвигают высокие требования к вычислительным программам, моделирующим образование и прохождение излучения в веществе элементов ускорителя и установок. Пакеты моделирования используются на всех стадиях подготовки эксперимента как для расчетов формирования сигнала в детекторах, так и для оценки фоновых и радиационных нагрузок установок, а также для прогнозирования радиационной обстановки за биологической защитой ускорителя.

За последнее время существенно расширилась область потенциального использования пучков адронов — появились проекты ядерно-энергетических установок с пучковой “накачкой”, обладающих более высоким уровнем безопасности, нежели традиционные АЭС. Развивается направление, связанное с переработкой (трансмутацией) долгоживущих ядерных отходов. Решение подобных задач требует развития соответствующего программного обеспечения и синтеза методологий описания транспорта частиц, разработанных в различных областях физики.

Не менее интересны задачи, связанные с исследованием развития ядерно-электромагнитных каскадов, индуцированных космическими лучами в атмосфере Земли.

Все вышеперечисленное позволяет считать, что проблема моделирования транспорта излучения и создания соответствующего программного обеспечения для решения подобных задач является **актуальной** для физики высоких энергий.

**Цель диссертационной работы** — создание и развитие алгоритмов и программных кодов, позволяющих описывать перенос частиц в веществе и основные процессы, сопровождающие развитие ядерно-электромагнитных каскадов.

**Автор защищает:**

- Структуру, алгоритмы и организацию программных кодов, объединенных в стандартный пакет MARS (версии MARS'93, MARS'96, MARS'98).
- Математическое обеспечение для отладки программного представления описания геометрически сложных объектов, обработки и представления результатов моделирования ядерно-электромагнитных каскадов в веществе.
- Разработку и развитие алгоритмов, описывающих основные физические процессы, происходящие при прохождении частиц через вещество.
- Модернизацию программного пакета ISAJET, моделирующего взаимодействие адронов при высоких энергиях.
- Результаты использования созданных программных пакетов при подготовке экспериментов и решении радиационных проблем на ускорителях ИФВЭ и ФНАЛ и коллайдерах Тэватрон, УНК, SSC и LHC.
- Результаты моделирования серии экспериментов на бустере ИФВЭ по исследованию развития адронных каскадов в протяженных мишенях при облучении их протонами средних энергий.

**Научная новизна и практическая ценность** работы определяется тем, что автором предложены и реализованы в программных кодах алгоритмы, позволяющие достаточно корректно и быстро проводить расчеты транспорта частиц через вещество. На смоделированных событиях найдены эффективные критерии, позволяющие выделять события с рождением  $\mu$ -мезонов в эксперименте Д0. Найденные критерии использованы в реальном эксперименте.

Для антипротонной мишени коллайдера Тэватрон (ФНАЛ) определены оптимальные параметры, полученные в результате расчетов, проведенных автором. Предложенные рекомендации с успехом используются на ускорителе ФНАЛ. Экспериментально исследованы энерговыделения и выходы нейтронов из мишени на пучке бустера ИФВЭ, показано согласие экспериментальных и расчетных данных.

Разработанные коды транспорта частиц через вещество используются в экспериментальных исследованиях, проводимых в настоящее время в таких центрах ядерной физики, как ИФВЭ, ЦЕРН и ФНАЛ. Они также будут полезны в экспериментах, которые планируются на новых ускорителях.

### **Апробация работы**

Диссертация основана на результатах исследований, выполненных автором в 1987-1998 гг. в Отделе радиационных исследований ИФВЭ в соответствии с планом работ по программам подготовки и проведения экспериментов на ускорителе У-70 и коллайдерах УНК, ФНАЛ и SSC.

Основные результаты исследований, вошедших в диссертацию, опубликованы в виде препринтов ИФВЭ и FNAL, а также в журнале "Nuclear Instruments & Methods" [1]—[10]. Они докладывались на Совещаниях Сотрудничеств УКД и SSC, а также на семинарах ИФВЭ.

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации — 98 страниц печатного текста, 29 рисунков и 6 таблиц; библиография включает 104 наименования.

## Содержание работы

**Первая глава** диссертации дает общее описание основных математически формализованных подходов к проблеме транспорта частиц и излучения через вещество.

Расчетные схемы ядерно-электромагнитных каскадов базируются на принципах статистической физики и часто выделяются в один из ее разделов — теорию переноса излучения (ТПИ). Совокупность уравнений, полученных в ее рамках, называют уравнениями переноса излучения или кинетическими уравнениями Больцмана. В достаточно общем виде их решение стало возможным с появлением быстродействующих ЭВМ и развитых библиотек стандартных программ. Наиболее популярен метод Монте-Карло (МК), который занял видное место среди других методов, используемых в различных областях теоретических и прикладных исследований.

**Во второй главе** рассмотрены основные процессы, происходящие при движении частиц в веществе. Анализируется природа возникновения ливней частиц в веществе, даны алгоритмические описания электрон-фотонных и ядерно-электромагнитных каскадов.

*Электрон-фотонные ливни* возникают при прохождении через вещество электронов (позитронов) или фотонов, обладающих высокими начальными энергиями. Существенной особенностью подобных процессов является то, что первичная частица теряет свою энергию не только на ионизацию и возбуждение атомов среды, но и на рождение вторичных частиц в поле атомов и атомарных электронов. Очевидно, что подобный процесс имеет лавинообразный характер, поэтому его принято называть электрон-фотонным ливнем (ЭФЛ).

В программе MARS базовой является быстрая одноветочная схема расчета ЭФЛ. Для задач, в которых требуется подробная информация о спектральных распределениях электронов, для моделирования ливня подключается программа EGS4.

*Перенос мюонов.* Основной источник мюонной компоненты ЯЭК — адроны, распадающиеся по каналам с рождением мюона в конечном состоянии. Другой источник, который в определенных кинематических областях вполне конкурирует с первым, — рас-

пад векторных мезонов. Розыгрыш распадов с рождением мюонов в рамках прямой (аналоговой) схемы моделирования ЯЭК оказывается малоэффективным, поэтому при их моделировании чаще используется так называемая весовая техника.

Моделирование транспорта мюона в пакете MARS осуществляется следующим образом. Вычисляются парциальные средние пробеги мюона в заданной среде до испускания им тормозного  $\gamma$  или фото-ядерного взаимодействия. Разыгрываются пространственные координаты вершины такого события. В рамках рассматриваемого типа взаимодействия в этой точке моделируются параметры вторичных частиц. На пробеге до взаимодействия учитывается процесс многократного кулоновского рассеяния мюона. При этом траектория мюона разбивается на участки такой длины  $t$ , на которой выполняется условие  $\Delta E/E \ll 1$ , где  $\Delta E$  — сумма потерь мюона на ионизацию и возбуждение атомов, расчет которых включает случайные флуктуации, описываемые распределением Ландау, и потери на образование пар. В конце отрезка  $t$  разыгрываются случайные двумерные вектора поперечного смещения и угла рассеяния мюонов.

*Ядерно-электромагнитные каскады.* Полное сечение взаимодействия частиц с ядрами определяется главным образом суммой трех процессов:

- упругое рассеяние на ядрах как целое (когерентное рассеяние)  $\sigma_{el}$ ;
- упругое рассеяние на отдельных нуклонах ядра (некогерентное или квазиупругое рассеяние)  $\sigma_{el}^N$ ;
- неупругое взаимодействие, приводящее к рождению новых частиц (когерентное и некогерентное)  $\sigma_{inel}$ .

Таким образом, справедливо соотношение

$$\sigma_{tot} = \sigma_{el} + \sigma_{el}^N + \sigma_{inel}. \quad (1)$$

*Модели взаимодействий адронов с ядрами.* Одной из важных физических характеристик, необходимых при описании развития ЯЭК, являются макроскопические сечения упругого и неупругого взаимодействий, которые непосредственно связаны с соответствующими длинами свободного пробега адрона в веществе.

В последние годы предложено большое число моделей множественного рождения частиц при рассеянии на ядрах высокоэнергичных адронов, лептонов и т.д. В настоящее время кажется, что наибольшими перспективами обладают кварк-партонные модели.

Ключевой момент в программах моделирования ЯЭК — генератор адрон-ядерных взаимодействий, поставляющий информацию о характеристиках новых поколений адронов, рождающихся в каскаде. Такой генератор должен воспроизводить одночастичные инклюзивные спектры основных сортов вторичных частиц.

В базовом пакете MARS при моделировании ЯЭК используется набор инклюзивных генераторов адрон-ядерных взаимодействий, основанных на феноменологических моделях.

*Нейтроны низких энергий в ЯЭК.* В терминологии, связанной с МК-пакетами, под понятием “медленные” (или низкоэнергетические) нейтроны обычно подразумевают частицы с энергиями ниже пороговой (10–20 МэВ). Обычно значение этого порога служит ключом, который определяет переход к разным частям пакета моделирования ЯЭК.

Нейтроны низких энергий с определенной вероятностью рождаются, во-первых, в реакциях расщепления ядра. Во-вторых, образуются при снятии возбуждения с промежуточных ядер-остатков после реакции расщепления. Подобные нейтроны принято называть испарительными. Дополнительным источником нейтронов могут служить возбужденные осколки деления тяжелых ядер-остатков. Возможны также фотоядерные реакции. Последние могут оказаться значимыми на электронных ускорителях.

Вероятность взаимодействия нейтронов с ядрами зависит от энергии нейтрона и структуры ядра и может быть весьма различна даже для изотопов одного и того же элемента. Полное сечение взаимодействия нейтронов с ядрами  $\sigma_{tot}$  является суммой парциальных сечений таких процессов, как упругого  $\sigma_{el}$  и неупругого  $\sigma_{inel}$  рассеяний, ядерных реакций  $\sigma_x$  и реакции деления  $\sigma_f$ .

Нейтроны также являются источником фотонов, которые могут образовываться в реакциях с их участием. Такими реакциями являются неупругое рассеяние нейтронов на ядре, захват нейтро-



на ядром, а также реакция деления ядер медленными нейтронами. Корректный учет этого канала ЯЭК чрезвычайно важен при решении фоновых задач на коллайдерных детекторах, что обусловлено принципиальной конструкцией подобных детекторов.

В пакете MARS при транспорте и описании взаимодействий нейтронов используется многогрупповая система констант. Учитываются рождение вторичного гамма-излучения и вероятность деления тяжелых ядер нейтронами.

**В третьей главе** рассмотрены проблемы, связанные с разработкой, модернизацией и использованием пакетов моделирования столкновения частиц при высоких энергиях.

Многолетний опыт разработки алгоритмов транспорта излучения в веществе позволил создать замкнутый комплекс программ, позволяющий моделировать электрон-фотонные ливни, ядерно-электромагнитные каскады и мюонный транспорт. Этот пакет включает программы, реализующие совместную визуализацию геометрии исследуемых конструкций и смоделированных событий. С его помощью можно создавать, редактировать и отлаживать алгоритмы описания сложных геометрий, извлекать базы данных о сечениях взаимодействия частиц, создавать различные представления результатов моделирования.

*Рождение частиц при столкновении адронов.* Существенная часть экспериментальных исследований прямым или косвенным образом базируется на результатах моделирования столкновения адронов. В настоящее время при исследовании рассеяния адронов широко используются пакеты, существенное отличие которых заключается в описании механизма фрагментации партонов. Кроме независимой фрагментации (ISAJET) и струнной модели (PYTHIA), используется также кластерный механизм (HERWIG).

В версию пакета ISAJET (версия 6.31) были внесены необходимые дополнения [1], которые позволили использовать все многообразие параметризации структурных функций, предоставляемое пакетом PDFLIB.

*Алгоритм смешивания событий.* В коллайдерах с высокой светимостью происходит несколько взаимодействий на одно пересечение банчей. Таким образом, события, определяющие фоновые загрузки, являются фактически суперпозицией нескольких элементарных актов взаимодействия пучковых адронов. Чтобы воспроизвести этот фон, разработан алгоритм смешивания соответствующих монтекарловских  $n_{mb}$  мягких и  $n_{jet}$  жестких событий рассеяния адронов [1,5]. Числа  $n_{mb}$  и  $n_{jet}$  являлись случайными числами с пуассоновскими распределениями. Вершины взаимодействий адронов из “смешанного” события разыгрываются в рамках некоторого распределения, соответствующего параметрам сталкивающихся пучков.

Наши исследования показали [1,3,5,6], что характеристики фоновых событий существенно влияют на оценки множественности регистрируемых частиц. Разработанный алгоритм позволяет получать более корректные их оценки.

*Программные пакеты моделирования ЯЭК.* Для прослеживания за прохождением частиц через вещество установок широко применяются МК пакеты GEANT, FLUKA, MARS [8,9], GCALOR. Они позволяют учитывать разные физические процессы при взаимодействии частицы со средой, формировать отклики детекторов, графически представлять как отдельные части установки, так и всю установку в целом. Одной из возможностей является представление треков частиц, проходящих через установку. При трассировании частиц могут учитываться магнитные и электрические поля. Для описания начального взаимодействия пучковых частиц используются как правило программы PYTHIA, ISAJET или DTUJET.

*Представление геометрии.* Достаточно точное представление геометрии является необходимым условием для получения качественных предсказаний любых численных методов, описывающих ЯЭК. Как правило, это требует высоких затрат как времени программиста, так и ресурсов ЭВМ. При решении подобных задач используются определенные приближения, которые можно условно разбить на два класса. Первый — “аналитический метод”, когда геометрия представляется в виде набора аналитически заданных

поверхностей и тел, например таких, как тела вращения и их комбинации. Подобный подход используется в пакетах MORSE и FLUKA.

Второй подход состоит в том, что геометрия разбивается на элементарные объемы стандартных форм, каждый из которых определен в своей собственной системе координат, параметрически связанной с общей системой. Элементарные объемы могут вкладываться в другие подобные объемы.

Алгоритмы построения траекторий движения частиц при моделировании переноса излучения различны в рамках каждого из указанных методов представления геометрии задачи. В первом случае для этого необходимо решить систему уравнений, решение которых отвечает координатам точки пересечения луча, идущего вдоль траектории движения излучения, и заданных поверхностей, разграничивающих элементы объема вещества, в котором транспортируется излучение.

Во втором случае программная реализация процедур определения координат положения излучения относительно границ вещества требует такой структуризации памяти, которая позволяла бы быстро проводить: локализацию границ элементарных объемов; перебор вложенных элементарных объемов; поиск ветвления дерева адресов элементов геометрии. Определяющее значение в данном случае имеет быстродействие алгоритма, находящего соответствие текущей координаты номеру элемента геометрии.

Пакет MARS [8,9] использует в качестве основного варианта описания геометрии подход, отвечающий второму классу. Достаточно емкий “словарь” элементарных объемов и развитый инструментарий работы с ним позволяют создавать гибкий и вместе с тем мощный аппарат для решения широкого круга задач моделирования.

При расчетах каскадов в сложных геометриях большое значение имеет наличие возможности — относительно быстро вносить изменения в алгоритм описания геометрии и отлаживать новые варианты исходных данных. Для этого в пакете MARS разработан специальный инструментарий, который, во-первых, позволяет проводить визуализацию геометрии задачи в том виде, как она используется программой моделирования на различных этапах расчета.

Во-вторых, он реализует систему специальных тестов геометрии для поиска типичных ошибок в ее задании — например перекрывающихся элементов. Кроме того, он рассчитывает методом Монте-Карло объемы элементарных ячеек.

*Базы данных в задачах транспортировки излучения.* В пакетах моделирования ЯЭК можно выделить следующие случаи, где используются базы данных. Во-первых, это касается создания интерфейсных подпрограмм, необходимых для извлечения структурных функций из базы данных PDFLIB. Необходимое программное обеспечение было создано автором для пакета ISAJET 6.31 [1].

Во-вторых, сечения реакций взаимодействий частиц на ядрах различных элементов. Данные, извлекаемые из подобных библиотек, при необходимости экстраполируются в область исследуемых энергий и/или исследуемых значений атомных номеров с использованием широко распространенных соотношений или суммы каких-либо заданных функций (например, полиномов). Параметризация выполняется на стадии инициации пакетов транспортировки или при подготовке промежуточных файлов констант описания транспорта и взаимодействий частиц. Например, сечения взаимодействий медленных нейтронов с ядрами получены с использованием многогруппового представления [8].

В-третьих, базы данных по реакциям взаимодействия частиц ЯЭК с ядрами вещества используются для свертки рассчитанных при моделировании ЯЭК функционалов и получения, например, вероятностей трансмутации тяжелых радиоактивных ядер [9], скоростей наработки радиоактивных изотопов вокруг мощных источников излучения, а также для оценки уровней наведенной радиоактивности [10].

*Визуализация результатов моделирования.* Для пакетов моделирования взаимодействия адронов ISAJET и PYTHIA автором подготовлены интерфейсные программы, позволяющие создавать DST. Стандартная форма записи смоделированных событий позволяет работать с ними как с экспериментальными данными. Подобный подход позволяет избежать дополнительных неопределенностей

при сравнении экспериментальных и расчетных данных, которые могут быть связаны с различиями в программах их анализа.

*Визуализация геометрии и процесса транспорта частиц.* Для целого ряда расчетных задач оказывается полезным графическое представление полученных результатов. В первую очередь, велико значение подобного инструмента в процессе описания геометрии установок, ее узлов, мишеней и т.д. Далее, огромное значение имеет визуальный поиск топологических особенностей физических процессов, по тем или иным причинам интересных при проектировании экспериментов или узлов ускорителя.

В развиваемом нами программном комплексе в рамках пакетов HIGZ и RAW созданы необходимые интерфейсные программы [8], для графического отражения информации о геометрии задачи и транспорте частиц.

В данном разделе также рассмотрены аналитические подходы к интегральному описанию характеристик ливней частиц. Подобное описание позволяет существенно сократить время счета при моделировании реакции детекторов на проходящие через них частицы.

В рамках пакета GEANT [7] создан блок подпрограмм, позволяющих использовать аналитические зависимости для оценок средней энергии каскадов, выделяющейся в любой секции калориметра, а также “размазывание” координаты начала ЭФЛ.

**Четвертая глава** диссертации посвящена обсуждению практических задач, которые были решены с помощью развитого и описанного выше математического обеспечения. В частности, это относится к таким экспериментам как Д0 (ФНАЛ, США)[2,3], УКД (ИФВЭ, Россия)[1,5], SDC (SSCLab, США)[7], CMS (ЦЕРН, Швейцария) и другие.

*Антипротонный источник коллайдера ФНАЛ.* Одной из важных характеристик эксперимента на коллайдере является число событий, накопленных за проведенный сеанс. Эта величина связана со светимостью  $\mathcal{L}$ , поставляемой коллайдером. Интенсивность выхода антипротонов из мишени антипротонного источника непосредственно влияет на интегральную светимость коллайдера.

В данном разделе проведены МК-исследования характеристик основных физических процессов, протекающих в мишени. Цель — оптимизация выбора материала и параметров пучка антипротонного источника ФНАЛ [2].

Проведены сравнения результатов расчетов выходов антипротонов из протон-ядерного взаимодействия по программе FLUKA с экспериментальными данными. Показано, что результаты FLUKA неплохо согласуются с экспериментом и воспроизводят слабую  $A$ -зависимость выхода антипротонов, в то же время результаты расчетов по программе CASIM, которые легли в основу первоначального проекта источника с использованием вольфрамовой мишени, лежат существенно выше данных FLUKA и показывают сильную  $A$ -зависимость.

С точки зрения предельно допустимого энерговыделения в мишени, определяющим является процесс распространения ударных волн, что приводит к допустимому пределу энерговыделения  $E_{max} = 200$  Дж/г. С учетом этого ограничения мишень, изготовленная из меди, при параметрах пучка антипротонного источника ФНАЛ выдерживает интенсивность втрое выше той, которая может быть использована для вольфрамовой мишени. Таким образом, переход к медной мишени позволяет существенно повысить выход антипротонов. Впоследствии вариант с медной мишенью был реализован для коллайдера ФНАЛ.

*Мюонный спектрометр SAMUS эксперимента Д0.* Для оценки потоков частиц на отдельные подсистемы спектрометра SAMUS были использованы МК-пакеты ISAJET и MARS [3]. Показано, что основные источники частиц, регистрируемых соответствующими станциями SAMUS, являются каскады, развивающиеся на тех краях калориметров, которые граничат с ионопроводом ускорителя. Причем около 30-50% полного адронного потока на дрейфовые трубки SAMUS составляют заряженные адроны. Данные исследования указали на необходимость монтажа дополнительной защиты, которая и была введена в действующий вариант установки.

Для триггерных условий найдены ограничения на числа событий (отсчетов) на станциях А и С. Проведена оценка потерь статисти-

ки при наличии подобных порогов на множественности отсчетов. Эти результаты были использованы в сеансе Run I, проведенном в рамках эксперимента Д0.

*Разогрев мишени протонными пучками с энергией  $\sim 1$  ГэВ.* На бустере ИФВЭ выполнена серия экспериментов, в которых измерялись разогрев мишеней и выход нейтронов при облучении мишени пучком протонов средних энергий [4,10]. Эти данные интересны как для верификации программ моделирования, так и для оптимизации параметров мишени при проектировании электроядерных установок.

Совпадение данных эксперимента и расчетов, проведенных по программе MARS, достаточно хорошее, что показывает правомерность принятых нами приближений для описания физических явлений, протекающих при облучении мишени пучками адронов в этой области энергий.

*Радиационные нагрузки на элементы установки УКД.* Данный раздел посвящен расчетным оценкам распределения радиационных нагрузок на элементы установки в экспериментах на встречных пучках УНК при их энергии  $0.4 \times 3$  ТэВ [1,5,6].

Для оценок использовался программный пакет MARS. Первичное столкновение протонов при высоких энергиях разыгрывалось в рамках пакета ISAJET [1]. Для получения абсолютных значений суммарных оценок доз мы использовали “смешанные” события, алгоритм получения которых описан в главе 2.

Впоследствии разработанная для этой задачи методика расчетов была использована для аналогичных исследований, выполненных для детекторов EMPACT, SDC, CMS и других.

Расчеты показали, что доза, поглощенная активным веществом центрального калориметра (полистиролом), достигает 8 крад/год. Использование бериллия вместо алюминия в качестве материала для части вакуумной камеры в районе встреч пучков может снизить дозовую нагрузку примерно на 40%. Возможны проблемы в использовании РММА-шифтеров в конструкции центрального калориметра на расстоянии ближе 1 м от оси пучка. Анализ также показал, что ограничено стационарное использование органических

материалов в двух секциях торцевого калориметра, расположенных в области максимальных псевдобыстрот.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации:

1. Проанализированы основные процессы, происходящие при прохождении частиц через вещество. Созданы формализованные программные алгоритмы, описывающие такие процессы.
2. Создан программный пакет MARS/INER. Он включает: модули физических процессов, процедуры описания и отладки геометрии, программные средства оптимизации моделирования каскадов, процедуры визуализации геометрии и результатов расчетов. Пакет используется в настоящее время для расчетных исследований в ИФВЭ, ЦЕРН и ФНАЛ.
3. Исследован широкий круг прикладных физических проблем, связанных с подготовкой и проведением экспериментов на коллайдерах.
  - С помощью пакета MARS исследованы калориметры различной геометрии. Проведена оптимизация геометрии калориметров.
  - Проведена подготовка и моделирование серии экспериментов на бустере ИФВЭ, получены данные по энерговыделениям и выходам нейтронов из мишеней.
  - Разработаны и проверены на данных триггерные условия регистрации мюона для эксперимента Д0.
4. Модернизированы и адаптированы к условиям эксперимента программные пакеты, позволяющие моделировать адрон-адронные и адрон-ядерные взаимодействия. Создан интерфейсный программный пакет, позволяющий использовать многообразие параметризаций структурных функций, предлагаемое библиотекой PDFLIB. Введены соответствующие управляющие ключи в варианты пакетов PYTHIA 5.6 и ISAJET 6.49. Модернизация, в частности, коснулась:
  - создания и программной реализации алгоритма смешивания мягких событий;



- подпрограмм, описывающих распады частиц: включены те распады, которые отсутствуют в стандартных вариантах пакетов RUTHIA, FRITIOF и т.д.

### Список литературы

- [1] И.Л. Ажгирей, А.П. Воробьев, Е.А. Козловский, Н.В. Мохов, *Моделирование характеристик  $pp$ -взаимодействий и каскадов вторичных частиц для Универсального Калориметрического Детектора УНК*. Препринт ИФВЭ 87-151, Серпухов, 1987.
- [2] I.L. Azhgirey and N.V. Mokhov. *Antiproton Production and Energy Density Limitations in Targets for the Fermilab Pbar Source*. – Preprint FNAL, FERMILAB-TM-1529, 1988.
- [3] I.L. Azhgirei, N.V. Mokhov, and A.V. Uzunian. *Background particles fluctuations in the D0 small angle muon system at FERMILAB*, Preprint IFVE-90-69, 1990.
- [4] V.I. Belyakov-Bodin, V.D. Kazaritsky, I.V. Chuvilo, V.A. Sherstnev, J.M. Ado, I.L. Azhgirey, N.V. Mokhov. *Calorimetric measurements and Monte Carlo analyses of medium-energy protons bombarding lead and bismuth targets*. // Nucl. Instrum. Methods A, 1990, vol. 295, p. 140.
- [5] И.Л. Ажгирей, Н.В. Мохов, *Радиационные нагрузки на элементы установки для экспериментов на  $0.4 \times 3$ -ТэВ коллайдере УНК*. – Препринт ИФВЭ 90-132, Протвино, 1990.
- [6] I.L. Azhgirey, N.V. Mokhov. *Radiation levels in the UNK experiments*. In: Proc. of the 3rd Workshop “Physics at UNK”. – Protvino, 25–28 Sep. 1990, p.18.
- [7] I. Azhgirey and S. Linn. *A comparison of MARS and GEANT/GHEISHA for SSC dump calculation*. // Nucl. Instrum. Methods B, 1992, vol. 66, p. 437.

- [8] И.Л. Ажгирей, И.А. Курочкин, М.А. Маслов, В.В. Таланов, А.В. Узунян. *MARS93. Развитие комплекса программ ИФВЭ для моделирования ядерно-электромагнитных каскадов в области энергий до 20 ТэВ.* – Препринт ИФВЭ 93-19, Протвино, 1993.
- [9] И.Л. Ажгирей, И.А. Курочкин, В.В. Таланов. *Развитие комплекса программ MARS для решения радиационно-физических задач проектирования электроядерных установок.* В сб.: Материалы XV совещания по ускорителям заряженных частиц. – Протвино, 1996, с.74.
- [10] И.Л. Ажгирей, И.А. Курочкин, В.И. Беляков-Бодин. *Моделирование облучения вольфрамовой мишени протонами средних энергий.* В сб.: Тезисы докладов на VII Конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. – Обнинск, 1998, с.350.

*Рукопись поступила 20 ноября 2000 г.*

И.Л. Ажгирей.

Развитие программного обеспечения расчетов ядерно-электромагнитных каскадов.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы  $\text{\LaTeX}$ .

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

---

Подписано к печати 20.11.2000. Формат  $60 \times 84/16$ . Офсетная печать.

Печ.л. 1. Уч.-изд.л. 0,83. Тираж 100. Заказ 225. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2000-52, И Ф В Э, 2000

---