



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

IHEP

На правах рукописи  
2002-17

Таланов Вадим Вадимович

РАЗВИТИЕ АЛГОРИТМОВ И КОДОВ  
ДЛЯ РАСЧЕТА ТРАНСПОРТА ЧАСТИЦ  
В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕНОСА  
ИЗЛУЧЕНИЯ

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Протвино 2002

УДК 539.1.07

M-24

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

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук  
И.Л. Ажгирей.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук Е.А. Козловский (ОНФ, ИФВЭ, г. Протвино), доктор физико-математических наук Н.С.Амелин (ЛВЭ, ОИЯИ, г. Дубна).

Ведущая организация – Институт теоретической и экспериментальной физики (г. Москва).

Защита диссертации состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2002 г.  
в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета К 201.004.01  
при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281,  
г. Протвино Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “      ”              2002 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета К 201.004.01 В.Н. Ларин

© Государственный научный центр  
Российской Федерации  
Институт физики высоких энергий, 2002

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Расчет распространения излучения в веществе при проектировании элементов ускорителей заряженных частиц, экспериментальных установок в физике высоких энергий и ядерной физике требует интенсивного применения математического аппарата. В настоящее время каждая ядерно-техническая установка представляет собой уникальный проект, поэтому результаты численного моделирования служат одним из основных доводов в пользу той или иной технологии изготовления как детекторов частиц или элементов структуры ускорителей, так и конфигурации защиты или сценария функционирования и обслуживания установки.

Многообразие физических процессов, протекающих при высоких энергиях, приводит к необходимости разработки специального программного обеспечения для исследования полей вторичного излучения. Программные пакеты, предназначенные для компьютерного моделирования прохождения частиц через вещество, используют разные подходы к описанию как процессов взаимодействия частиц с веществом, так и к представлению транспорта излучения и геометрии исходной задачи. Эффективность алгоритмов геометрического модуля определяет трудоемкость вычислений как при подготовке исходных данных расчета, так и во время собственно процесса моделирования. При этом в отдельных программных пакетах модули расчета транспорта отсутствуют; можно констатировать, что в об-

щем случае число библиотек программ, реализующих различные физические модели, значительно больше, чем число программных реализаций различных алгоритмов и методов расчета транспорта частиц.

**Актуальность** работы обуславливается требованием адекватного представления сложной геометрии современных физических установок при сопровождении численным моделированием всего цикла проектирования и эксплуатации физического оборудования. Современные проекты предлагаемых экспериментов включают в себя детекторы, отличающиеся как по физическому назначению, так и по степени их детализации, которую необходимо использовать в расчетах. Так, в задачах о старении детектирующих элементов толщина слоя чувствительного вещества составляет доли миллиметра, а характерные размеры самих детекторов могут достигать нескольких метров. Составляющий более четырех порядков разброс характерных масштабов конструкционных элементов делает чрезвычайно трудоемкой как общую задачу расчета транспорта частиц в полной геометрии эксперимента, так и сам процесс подготовки, отладки и модификации описания геометрии, необходимого для проведения расчета. В условиях, когда описание геометрии представляет собой большой массив данных со сложной структурой, становится актуальной задача создания как алгоритмов и методов, позволяющих эффективно работать с такими данными, так и программных кодов для преобразования и анализа геометрической информации.

**Целью диссертационной работы** является развитие и создание алгоритмов и кодов, предназначенных для расчетов транспорта частиц.

**Автор защищает:**

- Структуру и программную реализацию библиотеки процедур геометрического модуля программного пакета MARS.
- Разработанное представление геометрии для моделирования переноса частиц, и алгоритм расчета транспорта частиц с использованием хеширования и поиска по дереву элементов.

- Созданные алгоритмы и коды для визуализации и преобразования описаний геометрии, реализованных в виде программного окружения пакета MARS.
- Данные по верификации разработанных алгоритмов и методов и созданного программного обеспечения при решении задач моделирования полей вторичного излучения.
- Результаты использования созданного программного обеспечения при подготовке проекта передней радиационной защиты эксперимента CMS в ЦЕРН.
- Данные по моделированию поля вторичного излучения, а также по радиационным нагрузкам на детекторы центральной области эксперимента LHCb на LHC.

**Научная новизна и практическая ценность.** Созданные алгоритмы и коды позволили моделировать перенос излучения с использованием программного пакета MARS на принципиально новом уровне точности расчетов. С помощью разработанного программного обеспечения впервые проведены расчеты транспорта частиц в полной геометрии установок, проектируемых для ряда экспериментов физики высоких энергий. В расчетах учтены все существенные детали конструкции детекторов и оборудования. Для эксперимента CMS на LHC выполнен анализ инженерного проекта передней радиационной защиты, проведены оценка и оптимизация конфигурации этой защиты и используемых в ней материалов. Для эксперимента LHCb исследованы механизмы формирования полей вторичного излучения в центральной области эксперимента; найдена зависимость нагрузок на отдельные детекторы установки от их расположения и конструкции вакуумной камеры в экспериментальной зоне; даны рекомендации, относящиеся к конструкции этих детекторов.

**Апробация работы и публикации.** Диссертация основана на результатах исследований, выполненных автором в 1992–2002 гг. в Отделе радиационных исследований ИФВЭ в соответствии с планом работ по подготовке и проведению экспериментов в ИФВЭ и ЦЕРН, на коллайдерах SSC и LHC.

Основные результаты исследований, вошедших в диссертацию, опубликованы [1–8] в виде препринтов ИФВЭ и статей в журнале “Приборы и техника эксперимента”; они докладывались на Рабочем совещании по ускорителям заряженных частиц (Протвино), Российской конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок (Обнинск), рабочих совещаниях международных коллабораций ATLAS, CMS и LHCb.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 106 страниц, включая 20 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 91 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дается постановка задачи, обосновываются ее актуальность, научная новизна и практическая ценность, кратко излагается содержание работы.

**В первой главе** диссертации вводятся основные понятия программ моделирования переноса частиц методом Монте-Карло. Кратко излагается теория однородных марковских цепей в их приложении к решению уравнения переноса, приводится обзор программ и инструментариев для решения задачи переноса излучения, рассматриваются понятия программного окружения и парадигмы программирования.

Моделирование прохождения частиц через вещество методом Монте-Карло с использованием однородных марковских цепей является одним из основных инструментальных средств, используемых для проведения *вычислительных экспериментов*, имитирующих реальные процессы, происходящие при работе ускорителей заряженных частиц и физических установок. Достоинством численного метода Монте-Карло, принимая во внимание многообразие физических процессов при высоких первичных энергиях, являются простота и наглядность получаемых алгоритмов решения вычислительных задач. Программные реализации алгоритмов в виде процедур вместе с соответствующими им структурами данных объединяются в

программы или библиотеки программ, а разработанные подходы к созданию “хороших” программ, называемые парадигмами программирования, указывают основные моменты проектирования и программной реализации кода. Существующие в настоящее время программы моделирования имеют каждая свою область практического применения и используют самые разнообразные алгоритмы и модели как для описания физических процессов, так и для транспорта частиц и представления геометрии расчетной задачи.

**Вторая глава** посвящена основным алгоритмам и методам, используемым для решения задач транспорта частиц. Рассматриваются ограничения на ядро оператора интегрального уравнения переноса, позволяющие частично разделить переменные уравнения. В частности, эта операция позволяет выделить часть ядра, которая отвечает описанию геометрического модуля программы моделирования, где и осуществляется транспорт частиц. Также в данной главе анализируются существующие алгоритмы транспорта частиц и подходы к представлению геометрии в программных пакетах.

Использование однородной марковской цепи для построения оценки линейного функционала на решении многомерного интегрального уравнения составляет основу моделирования переноса частиц методом Монте-Карло. Дополнительные условия на ядро интегрального оператора уравнения переноса позволяют представить переходную плотность вероятности в виде суперпозиции нескольких плотностей, зависящих от разных переменных фазового пространства. При данных ограничениях становится возможным разделить все конечные алгоритмы на принадлежащие трем условно независимым программным модулям: модуль генераторов, физический и геометрический модули. Практика показывает, что на стадии разработки программы моделирования основное время затрачивается на отладку модуля генераторов и физического модуля, однако на стадии полномасштабного моделирования главной ресурсоемкой частью программы становится геометрический модуль. Последнее накладывает особые требования на выбор используемого оптимального представления геометрии и метода транспорта частиц.

Представление геометрии вместе с методом транспорта является частью геометрического модуля программы моделирования переноса частиц. В программах моделирования переноса частиц методом Монте–Карло наиболее часто встречаются различные реализации *аналитического* представления геометрии. В этом подходе геометрия расчетной задачи есть набор аналитически заданных граничных поверхностей второго порядка, что и обуславливает его название:

$$\begin{aligned} F(x, y, z) = & a_{11} x^2 + a_{22} y^2 + a_{33} z^2 + 2a_{12} xy + 2a_{13} xz \\ & + 2a_{23} yz + 2a_1 x + 2a_2 y + 2a_3 z + a_0 = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Созданный значительный математический аппарат аналитических методов решения уравнения переноса в случае простой сферической или цилиндрической геометрии может быть естественно распространен на другие случаи, позволяющие аналитическое описание геометрии. Описание сложной трехмерной геометрии в аналитическом представлении реализуется с помощью теоретико-множественного (или *комбинаторного*) подхода. Такой подход заключается в задании для каждой поверхности правила определения, по какую сторону от нее находится точка с заданными координатами: одна из сторон назначается внешней, другая внутренней. Тогда исследуемую область пространства можно представить в виде набора зон, каждая из которых состоит из точек, лежащих внутри одного и вне другого множества граничных поверхностей типа (1). Для этого используются операции сложения и вычитания множеств:

$$Z_1 \in M_1 \oplus M_2 \ominus M_3. \quad (2)$$

Применение комбинаторного подхода привело к появлению представления геометрии в виде *элементарных объемов*. В этом подходе геометрия расчетной задачи представляется в виде совокупности трехмерных тел, имеющих одну из заданных форм: параллелепипед, цилиндр, конус, трапецид и т.д. Каждый элементарный объем может быть независимо определен в основной системе координат, произвольно ориентирован или вложен в другой, и по сути представляет

уже готовую зону описания геометрии типа (2), избавляя пользователя от самостоятельного ее конструирования. В случае многократной вложенности при определении объема, которому принадлежит точка с заданными координатами, используются стандартные алгоритмы поиска по дереву элементов.

Расчет транспорта частиц в программе моделирования осуществляется методом, алгоритмы которого соответствуют выбранному представлению геометрии задачи в программе моделирования. Достоинством аналитического метода транспорта частиц, соответствующего аналитическому представлению геометрии, является возможность определения за один проход координат следующей точки взаимодействия и вычисления соответствующих вкладов в оценки функционалов. Однако транспорт заряженных частиц требует учета квазинепрерывных процессов: потеря энергии на ионизацию, многократного кулоновского рассеяния, действия магнитных полей, в связи с чем величина шага транспорта частицы уже определяется конкретной моделью того или иного физического процесса и становится существенно меньшей длины пробега до взаимодействия.

Для пошагового транспорта частиц был предложен *итерационный* метод транспорта, широко применяемый в расчетах при высоких энергиях. Суть данного метода заключается в том, что длина свободного пробега частицы до взаимодействия исчерпывается конечной последовательностью шагов постоянной или переменной величины, при этом длина очередного шага определяется в рамках приближения квазинепрерывных процессов. Особенностью итерационного метода также является то, что в нем точка пересечения траектории частицы с граничной поверхностью не вычисляется, а локализуется с заданной наперед погрешностью.

Ключевым моментом итерационного метода является процедура определения номера зоны транспорта по текущим координатам точки, называемая также процедурой решения задачи “где я?”. Однако это требует введения дополнительного, по сравнению с аналитическим методом, представления о том, как именно граничные поверхности делят исследуемую область на отдельные зоны. Поэтому итерационный метод естественно сочетается с представлением гео-

метрии в виде набора элементарных объемов, где геометрические данные структурированы изначально. Сама задача определения номера зоны транспорта по значению координат частицы является одной из типичных задач поиска, для решения которой естественно использовать существующие математические методы.

**В третьей главе** представлены разработанные для пакета MARS алгоритмы, методы описания геометрии и транспорта частиц, программно реализованные в виде библиотеки процедур геометрического модуля пакета. С целью графического представления геометрии расчетной задачи и использования геометрической информации в различных форматах для геометрического модуля пакета разработано программное окружение, включающее алгоритмы и коды для использования внешних баз данных и описаний и для визуализации геометрии.

Программный пакет MARS разработан в ИФВЭ для моделирования ядерно-электромагнитных каскадов и транспорта вторичных нейтронов и мюонов. Отличительной особенностью пакета является использование инклузивного подхода к моделированию акта адрон-ядерного взаимодействия. Такой подход существенно уменьшает число ветвей дерева траекторий частиц, которые надо просматривать, тем самым сокращая время, необходимое для расчета одной истории. В то же время при проведении расчетов переноса частиц в полной геометрии проектируемых установок и конструкций самой ресурсоемкой частью пакета становится модуль геометрии. С целью оптимизации транспорта частиц в пакете MARS разработан новый универсальный геометрический модуль, который вместе с процедурами, входящими в его программное окружение, обеспечивает эффективный расчет и построение оптимального дерева траекторий частиц.

Разработанное для программного пакета MARS описание геометрии на основе представления ее в виде набора элементарных объемов призвано решить задачу эффективного описания сложных конструкций проектируемых установок физики высоких энергий. Использование стандартного набора элементов геометрии позволяет

пользователю пакета создавать геометрию расчетной задачи без изменения основного кода пакета. Каждый элементарный объем может быть независимо позиционирован, ориентирован или вложен в другой элемент геометрии. Наличие встроенного механизма описания нестандартных элементов, рассматриваемых алгоритмами и процедурами геометрического модуля по тем же правилам, что и для стандартных элементов, обеспечивает требуемую гибкость и возможность оптимизации кода для расчета конкретных задач.

Алгоритм итерационного метода транспорта частиц является основным алгоритмом геометрического модуля пакета MARS. Ключевым его моментом является процедура определения номера  $N$  области транспорта по значению текущей координаты  $\vec{r}$  конца шага транспорта, для чего в общем случае требуется перебрать все  $N_0$  элементов геометрии. Для оптимизации такого перебора в предложенном геометрическом модуле используется метод поиска по дереву элементов геометрии. Назовем объем  $V_m$  вложенным в  $V_n$ , если все точки  $V_m$  принадлежат  $V_n$  и эти два объема не совпадают. В этом случае объем  $V_n$  еще называют родительским, а  $V_m$  дочерним, и говорят о возникновении отношения *родитель–потомок*. У одного родительского объема может быть несколько дочерних, но каждый дочерний объем по определению принадлежит только одному родительскому. Тогда можно построить дерево объемов — элементов геометрии, и определение номера текущей зоны будет заключаться в нахождении такого объема, для которого данная точка расположена внутри его, но вне всех его дочерних объемов, если таковые есть. Введение отношений “родитель–потомок” позволяет ограничить число перебираемых элементов подмножеством объемов, вложенных в элемент, которому принадлежит текущая точка транспорта, сокращая время перебора примерно в  $N_0/N_v$  раз, где  $N_v$  есть среднее число вложенных элементов для одного родительского объема.

Данный алгоритм максимально эффективен в случае глубоких и слабо ветвящихся деревьев элементов. В противоположном случае для неглубоких, но сильно разветвленных деревьев вложенных объемов совместно с данным алгоритмом используется хеширование с применением связанных списков элементов. Схема полученно-

го алгоритма поиска приведена на рис. 1. Суть его заключается в построении функции хеширования  $H(\vec{r})$ , которая путем арифметических операций над значением текущих координат частицы дает адрес в таблице, по которому определяется номер текущей зоны транспорта, или номер списка элементов, связанных с данной зоной хеширования. В последнем случае элементы из списка последовательно перебираются до определения номера зоны транспорта. Процедура хеширования и использование списков элементов позволяют ограничить подмножество перебираемых объемов, выделив подветви дерева элементов, и дополнительно в  $N_v/N_{v_h}$  раз ускоряет работу алгоритма транспорта, где  $N_{v_h}$  есть среднее число объемов в одном связанном списке.

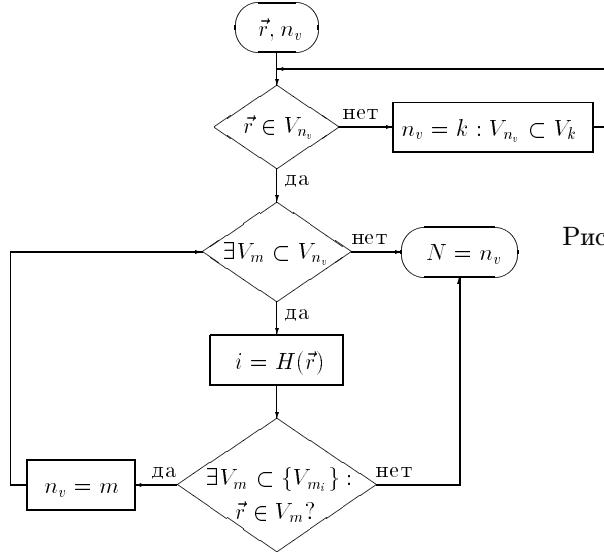


Рис. 1. Алгоритм поиска по дереву вложенных объемов геометрии с использованием функции хеширования и связанных списков.

Описанные алгоритмы и методы реализованы в виде набора процедур, независимых от других подпрограмм пакета MARS и использующих собственную, скрытую внутри геометрического модуля структуру данных. Каждая из этих процедур, в свою очередь, независима от других, и выполняет ограниченный набор элементарных операций. Конечной задачей геометрического модуля является пере-

дача процедурам физического модуля координат  $r'$  новой текущей точки транспорта, номера  $N$  области геометрии, которой данная точка принадлежит, а также определение по данному номеру новых параметров среды транспорта, а именно индекса материала и магнитного поля.

Создание сложных описаний геометрии невозможно без использования механизма их наглядного представления, необходимого как для проверки комбинаторной геометрии на непротиворечивость, так и для тестирования различных алгоритмов расчета транспорта частиц. Данные функции в составе программного окружения пакета MARS выполняет графическая библиотека, предназначенная для визуализации геометрии задачи и рассчитываемых траекторий частиц. Процедуры библиотеки используют загруженное и спроцессированное описание геометрии для подготовки массивов координат сечений и граничных точек элементов. Для визуализации траекторий процедуры библиотеки записывают координаты шагов транспорта частиц во внешний файл, при этом данные сортируются по типу частицы, энергии, номеру поколения и номеру зоны транспорта. Полученная геометрическая информация затем передается процедурам внешнего графического пакета для изображения графических примитивов.

Организация работы с большими массивами данных о геометрии требует специального программного обеспечения. Предложенным решением задачи, связанной с описанием геометрии, содержащим большие массивы информации со сложной структурой, является использование интерфейса с системой управления базами данных. Применение СУБД при подготовке описания геометрии позволяет упростить обновление и включение новой информации в описание, используя внутренние средства СУБД для обеспечения согласованности данных. Актуальной областью использования данной методики является проведение серий расчетов в геометрии, состоящей из большого числа элементов стандартной конструкции, характерной для ускорителей частиц.

Задача преобразования представлений геометрии из различных программ моделирования, или заданных в независимых форматах, возникает при проведении независимых тестовых расчетов по не-

скольким программам, или при необходимости использования уже существующего описания детекторов. Для ее решения в программное окружения пакета MARS включены алгоритмы и коды для преобразования и использования исходного описания геометрии из программы FLUKA, являющейся одной из базовых программ в данном классе расчетов. Поскольку описание геометрии является, как правило, самой громоздкой частью входных данных и основным потенциальным источником ошибок при проведении расчетов, а представления геометрии, принятые в программах моделирования, существенно отличаются друг от друга, то специальные программные средства упрощают процесс сравнения различных описаний геометрии, что избавляет пользователя от рутинной работы и проверки ошибок при подготовке описания.

**В четвертой главе** диссертации приведены полученные с помощью созданного программного обеспечения результаты решения практических задач для проектируемых в ЦЕРН совместно с ИФВЭ экспериментов CMS и LHCb, и верификации разработанных алгоритмов и методов на примерах моделирования полей вторичного излучения в конкретных системах детекторов.

Актуальным приложением предложенного программного обеспечения является сопровождение численными расчетами цикла проектирования новых установок. Одним из таких проектов является разрабатываемая в ГНЦ ИФВЭ совместно с ЦЕРН передняя радиационная защита эксперимента CMS. Выполнение расчетов по данному проекту потребовало постоянного внесения изменений в описание геометрии для обеспечения обратной связи между процессами физического и инженерного моделирования характеристик защиты. Применение описанных алгоритмов и кодов позволило на основе результатов численного моделирования провести анализ эффективности проекта защиты с точки зрения фоновых нагрузок на детекторы эксперимента. Полученные результаты расчета плотностей потоков частиц были представлены в сравнении с исходной идеальной моделью защиты. Также было выполнено исследование формирования поля вторичного излучения в области эксперимента

в зависимости от конфигурации защиты, предложены меры усиления защиты экспериментальной зоны детектора и дальнейшие пути оптимизации конструкции защиты.

Проекты современных экспериментальных установок включают в себя системы детекторов, различные как по своему физическому назначению, так и по уровню детализации, который необходимо учитывать при прогнозировании фоновой обстановки. Для случая кремниевых детекторов, широко применяемых в областях экспериментов с высоким уровнем радиационных нагрузок, толщина слоев чувствительного вещества, где необходимо получить численные оценки, измеряется в сотнях микрон, в то время как сами детектирующие станции могут располагаться на длине нескольких метров. Данные конструкционные особенности делают чрезвычайно трудоемкой задачу расчета поля вторичных частиц в полной геометрии детекторов, с учетом всем необходимых существенных деталей. Созданные алгоритмы и коды были успешно использованы для решения подобной задачи для проектируемого в ЦЕРН эксперимента LHCb на LHC. Использование разработанного программного обеспечения позволило провести численное моделирование формирования поля вторичного излучения в детекторах центральной области эксперимента. На полученных результатах были показаны особенности характеристик поля излучения в зависимости от расположения детекторов в эксперименте, приведены оценки радиационных нагрузок, определяющие функционирование детекторов в данной фоновой обстановке и предложены пути оптимизации конструкции детекторов и вакуумной камеры ускорителя.

В целом задача прогнозирования фоновой и радиационной обстановки при невозможности проведения экспериментальных измерений полей вторичных частиц является одной из актуальных задач проектирования новых экспериментов. В данной области устоявшимся подходом является применение нескольких кодов, использующих различные физические и геометрические алгоритмы при моделировании переноса частиц, для выработки *коэффициентов безопасности*, определяющих доверительный интервал полученных результатов моделирования. С целью выработки такого интервала в экс-

перименте LHCb был проведен сравнительный анализ результатов численного моделирования, полученных по программным пакетам MARS и GCALOR, при проектировании мюонного детектора, при этом особое внимание в сравнении было уделено единому описанию геометрии детекторов. По результатам сравнения было сделано заключение о возможности использования фактора 2 для коэффициента безопасности оценок радиационных нагрузок в детекторе.

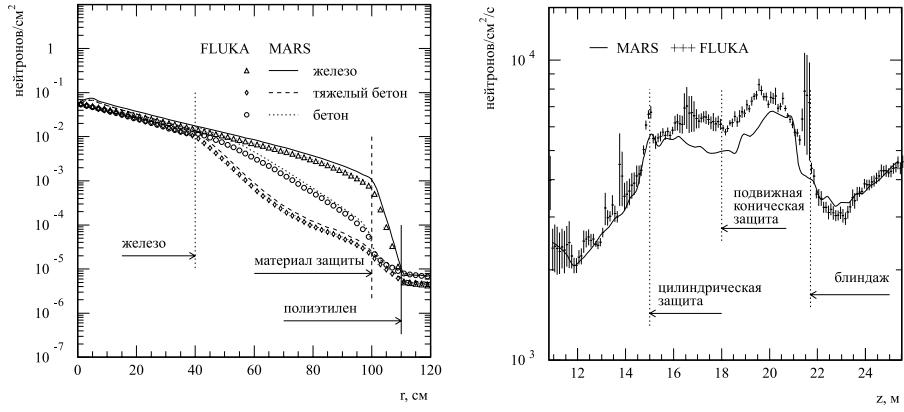


Рис. 2. Сравнение результатов расчета по пакету MARS и программе FLUKA. Слева — геометрия тестовой сборки защитных материалов, справа — базовая конфигурация инженерного проекта передней защиты эксперимента CMS.

С целью верификации алгоритмов пакета с помощью программного пакета MARS было выполнено сравнительное исследование эффективности модельных сборок различных защитных материалов, предполагаемых к использованию в проекте передней защиты эксперимента CMS. Параллельно независимой группой в ЦЕРН были выполнены аналогичные расчеты для тех же модельных сборок материалов, но с использованием программы FLUKA. Результаты расчета по двум программам приведены на рис. 2 (слева). Как можно видеть, для всех трех исследованных конфигураций защитных материалов, обе программы дают согласованные как абсолютные значения плотностей потоков нейтронов, так и радиальное ослабление потока вторичных частиц в зависимости от радиуса сборки.

Результаты расчетов по инженерному проекту передней защиты эксперимента CMS также были сравнены с результатами независимых расчетов по программе FLUKA99. Полученное по программе MARS продольное распределение плотности нейтронов на радиусе 3 м вокруг передней защиты, для номинальной светимости в точке встречи пучков эксперимента, равной  $10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , приведены сплошной линией на рис. 2 (справа). Там же приведены аналогичные результаты, полученные в ЦЕРН с использованием программы FLUKA99 (кресты). Как можно видеть, в областях, имеющих достаточно простую геометрию, а именно перед цилиндрической частью защиты и в области блиндажа, результаты расчетов по обеим программам, несмотря на все многообразие и сложность моделируемых физических процессов в рассматриваемом широком диапазоне энергий, находятся в хорошем согласии. В области цилиндрической и конической частей защиты согласие может быть признано удовлетворительным. Имеющееся в продольном распределении расхождение между результатами, даваемыми программами моделирования, объясняется доминированием в поле вторичного излучения в этой области частиц, проникающих в экспериментальный зал через стыки в конструкции передней защиты. Именно различие в подходах к представлению геометрии в двух программах, так называемый *геометрический фактор*, обуславливает различие в описании конфигурации участков сопряжения частей защиты, что и приводит к разнице в результатах моделирования для случая сложной геометрии детектора CMS, в отличие от описанной выше модельной сборки защитных материалов. Полученные результаты свидетельствуют также о критической важности корректного описания деталей геометрии при проведении расчетов в полной геометрии современных установок и конструкций.

**В заключении** подводятся основные итоги исследования:

1. Проанализированы основные понятия и закономерности построения программ моделирования переноса частиц в веществе, алгоритмы, используемые для расчета транспорта частиц, и методы представления геометрии в расчетных задачах.

2. Создан геометрический модуль пакета моделирования переноса частиц, основанный на представлении геометрии в виде набора элементарных объемов, для расчета транспорта частиц разработан и реализован программно итерационный алгоритм с использованием поиска по дереву вложенных объемов геометрии и хеширования, создано программное окружение модуля геометрии, включающее коды для визуализации и преобразования геометрической информации.
3. Разработанное программное обеспечение использовано для решения широкого круга прикладных задач в полной геометрии проектируемых экспериментов:
  - для проекта передней радиационной защиты эксперимента CMS на LHC проведено полномасштабное исследование формирования поля вторичного излучения в области детектора, в зависимости от конфигурации и материалов защиты, предложены рекомендации по конструкции данного узла экспериментальной установки;
  - для проекта детекторов центральной области эксперимента LHCb на LHC детально изучено поле вторичного излучения в зоне расположения регистрирующих станций, получена зависимость прогнозируемых нагрузок на чувствительные элементы детекторов от их положения в эксперименте, определены пути оптимизации конструкции конкретных детекторов.
4. Проведено сравнение предложенных алгоритмов и методов с реализованными в программах FLUKA и GCALOR на примерах расчета полей вторичного излучения в подсистемах детекторов CMS и LHCb.

### Список литературы

- [1] В.В. Таланов. *Универсальный геометрический модуль для программы MARS*. Препринт ИФВЭ 92-99, Протвино, 1992.
- [2] И.Л. Ажгирей, И.А. Курочкин, М.А. Маслов, В.В. Таланов, А.В. Узунян. *MARS93. Развитие комплекса программ ИФВЭ для моделирования*.

*ния ядерно-электромагнитных каскадов в области энергий до 20 ТэВ.*  
Препринт ИФВЭ 93-19, Протвино, 1993.

- [3] В.В. Таланов. *Построение программного окружения геометрического модуля комплекса MARS*. Препринт ИФВЭ 94-112, Протвино, 1994.
- [4] В.В. Таланов. *Формализация алгоритма моделирования транспорта частиц*. Препринт ИФВЭ 94-137, Протвино, 1994.
- [5] И.Л. Ажгирей, И.А. Курочкин, В.В. Таланов. *Развитие комплекса программ MARS для решения радиационных проблем ядерно-технических установок*. — В сб.: Материалы XV рабочего совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1996, с.74.
- [6] И.Л. Ажгирей и В.В. Таланов. *Статус комплекса программ MARS*. — В сб.: Труды XVII рабочего совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 2000, т.2, с.184–187.
- [7] И.Л. Ажгирей и В.В. Таланов. *Анализ эффективности передней радиационной защиты эксперимента CMS на LHC*. — М.: Наука, “Приборы и техника эксперимента”, №4, 2002.
- [8] В.В. Таланов. *Радиационные нагрузки на детекторы центральной области эксперимента LHCb на LHC*. — М.: Наука, “Приборы и техника эксперимента”, №4, 2002.

*Рукопись поступила 7 мая 2002 г.*

В.В. Таланов.

Развитие алгоритмов и кодов для расчета транспорта частиц в задачах моделирования переноса излучения.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.

Редактор Н.В.Ежела. Технический редактор Н.В.Орлова.

---

Подписано к печати 14.05.2002. Формат 60 × 84/16. Офсетная печать.  
Печ.л. 1,06. Уч.-изд.л. 0,9. Тираж 100. Заказ 87. 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 2002–17, И Ф В Э, 2002

---