



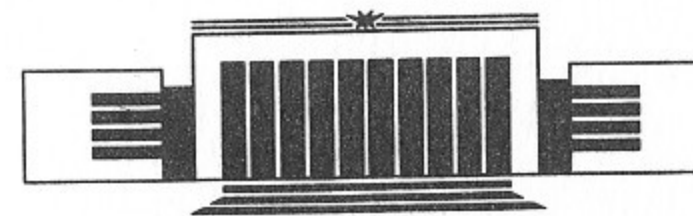
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

А.Д. Букин, Н.А. Грозина, М.С. Дубровин,
И.Л. Кац, В.Н. Иванченко, В.А. Таюрский,
С.И. Эйдельман

**UNIMOD-2 — УНИВЕРСАЛЬНАЯ ПРОГРАММА
МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ
НА ВСТРЕЧНЫХ e^+e^- -ПУЧКАХ**

Часть. I. Общее описание

ПРЕПРИНТ 90-93



НОВОСИБИРСК

АННОТАЦИЯ

Описана новая версия универсальной программы моделирования экспериментов на встречных e^+e^- пучках при энергии до 10 ГэВ. Программа работает под операционной системой СВМ на ЭВМ серии ЕС. По сравнению с предыдущей версией программы UNIMOD1, работающей в Институте ядерной физики СО АН СССР с 1982 г., существенно улучшена организация программы.

ABSTRACT

The new version of general purpose program is described allowing Monte Carlo simulation of e^+e^- colliding beam experiments at the energy up to 10 GeV. The program runs under the VM-CMS. As compared with the previous version of UNIMOD1, used at the Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR since 1982, the organization of the program is highly improved.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Введение	5
2. Общее описание программы	6
3. Моделирование процессов e^+e^- -аннигиляции	11
4. Процессы взаимодействия частиц с веществом	13
4.1 Рождение пар в поле ядра	13
4.2 Тормозное излучение.	13
4.3 Комpton-эффект и Рэлеевское рассеяние	13
4.4 Фотоэффект	13
4.5 Ионизационные потери	13
4.6 Аннигиляция позитронов	15
4.7 Рассеяние заряженных частиц на электронах атомов	16
4.8 Многократное рассеяние	16
4.9 Распады нестабильных частиц	16
4.10 Распады и взаимодействия остановившихся частиц	16
4.11 Ядерные взаимодействия адронов	17
4.12 Взаимодействие частиц со сложными веществами	17
5. Геометрические программы и учёт магнитного поля.	18
6. Моделирование реакции детектирующих устройств на прохождение частиц через них	20
7. Моделирование триггера	21
8. Ввод начальных данных и вывод результатов.	22
9. Средства отладки	23
10. Сравнение расчётов по программе UNIMOD2 с другими данными	26
11. Заключение	31
Литература	32

1. ВВЕДЕНИЕ

В планировании и обработке результатов экспериментов по физике высоких энергий широко используются программы моделирования прохождения элементарных частиц через вещество. В ведущих физических центрах популярны программы EGS, GEANT, FLUKA. При использовании этих программ для моделирования конкретного детектора, как правило, необходимо создать довольно большое количество программ, учитывающих его особенности. При этом возможности такого наращивания стандартной программы определяются её структурой.

В Институте ядерной физики СО АН СССР в течение длительного времени использовалась программа UNIMOD1 для моделирования экспериментов на встречных пучках [1]. Основная часть программы была создана в период с 1978 по 1982 г. Эксплуатация начата в 1982 г. Кроме методических расчётов, программа UNIMOD1 использовалась для моделирования экспериментов на детекторах НД (Нейтральный Детектор) на установке ВЭПП-2М [2] и МД-1 (Магнитный Детектор) на установке ВЭПП-4 [3].

Программа UNIMOD1 была первой в нашем Институте универсальной программой, пригодной для моделирования экспериментов на разных детекторах. За время эксплуатации программы появилось достаточно много идей улучшения программы, которые трудно реализовать эволюционным путем, поэтому была разработана программа UNIMOD2.

Дополнительным стимулом для создания новой версии программы UNIMOD явилась открывшаяся в ИЯФ СО АН возможность перейти на операционную систему СВМ (Система Виртуальных Машин).

Работа над проектом программы была начата осенью 1985 года.

Основной целью создания новой версии программы моделирования являлось повышение гибкости программы, обеспечение удобных возможностей по развитию программы, введению новых подпрограмм и их отладке. В частности, значительно расширяются и облегчаются возможности использования программ пользователем.

Заново разработан ввод данных, который позволяет оперативно переходить от сравнительно простых методических расчётов к моделированию полномасштабных детекторов.

В программе UNIMOD2 в значительной степени автоматизирован контроль за использованием общих областей, сведена к минимуму возможность их переполнения.

Геометрические описания детекторов, программы проведения частиц через геометрические элементы переведены на использование чисел двойной длины, что повышает точность расчётов, уменьшает вероятность систематических ошибок.

Настоящее описание программы UNIMOD2 содержит общее описание алгоритма моделирования и учитываемых процессов взаимодействия частиц с веществом детектора. Ввиду недостаточной подробности, его нельзя рассматривать как пособие по созданию аналогичных программ. В частности, большая часть формул не выписывается, а приводятся только ссылки. Подробное руководство пользователя по оформлению задания на счёт и написанию собственных подпрограмм планируется издать отдельно в следующей публикации.

2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

Программа UNIMOD2 может быть использована для широкого класса задач моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с возможностью перестройки программы в соответствии со сложностью задачи.

В описании работы программы неизбежно приходится использовать некоторые термины, связанные с организацией работы в СВМ (Система Виртуальных Машин), как-то: виртуальная машина, минидиски, виртуальный ридер и т.д. Описание этих терминов можно найти в комплекте математического обеспечения СВМ, а также, например, в [4].

Как и любая программа моделирования экспериментов по физике элементарных частиц, UNIMOD2 состоит из блока ввода и обработки заказа на счёт, цикла набора статистики и вывода результатов.

Исходные данные для ввода требуется приготовить по специальным правилам. Эти правила введены для удобства ввода, а также для более жёсткого контроля за ошибками. Интерпретатор ввода, разработанный для этой задачи, проверяет входные данные на синтаксические ошибки, а также на правильность ссылок на элементы детектора.

Программы ввода и обработки заказа зафиксированы и не могут быть оперативно изменены. Программа для цикла набора статистики и вывода результатов формируется на основании заказа на счёт. Это достигается включением в заказ на счёт списков программ, которые

используются для решения формализованных задач, например, поиск пересечения траектории с поверхностью некоторой геометрической фигуры, или вычисление сечения какого-либо процесса взаимодействия частиц с веществом, или генерация параметров частиц - продуктов столкновения электрона и позитрона и т.д. По указанию пользователя могут использоваться как готовые программы из библиотеки UNIMOD2, так и оригинальные программы пользователя, подготовленные в соответствии с описанием.

Для повышения удобства при работе с объёмными описаниями сложных детекторов введена возможность составлять полный заказ на счёт из отдельных файлов, которые могут иметь функциональное назначение.

Техническое решение проблемы "динамического" включения программ в сборку по списку такое же, как в [5].

При просмотре заказа на счёт производится не только поиск синтаксических ошибок, перенос данных в соответствующие общие блоки программы, но и генерация головной программы для счёта, в которой учтены реальные размеры общих блоков (что предотвращает выход за пределы общих областей) и обеспечивается обращение в соответствующих местах головной программы к программам, указанным в заказе. Сгенерированная программа транслируется и запускается на счёт.

Взаимные ссылки разных элементов заказа производятся по именам, назначенным этим элементам в заказе на счёт. Это облегчает контроль за правильностью ссылок и модификацию описания детектора при добавлении или вычеркивании элементов описания.

Заказ на счёт может компоноваться из отдельных числовых массивов, поэтому пользователь не должен для каждого счёта переписывать все списки программ, геометрическое описание детектора и т.д. заново, а может использовать ранее подготовленные массивы. В библиотеке UNIMOD2 имеются также стандартные массивы описания свойств веществ и элементарных частиц.

Запуск на счёт производится процедурой UNIMOD2, написанной на языке процедур REXX, поставляемом в комплекте математического обеспечения СВМ. Работа процедуры разбивается на несколько шагов. Сначала производится синтаксический анализ параметров процедуры. Если нет указания работать на каком-либо существующем у

виртуальной машины минидиске, то заказывается временный диск у системы, размечается, и далее вся информация будет записываться на него. Следующим шагом процедуры является обработка заказа на счёт. На основании заказа на счёт составляется головная программа на языке Фортран-77, в тексте которой записывается реальная длина обших блоков, соответствующая данному варианту счёта, а также вызовы в определенных точках программы соответствующих подпрограмм, ответственных за моделирование различных взаимодействий частиц с веществом, анализ возможности пересечения траектории частицы с поверхностью блока вещества, вывод результатов в конце счёта и т.д. Затем полученная программа транслируется и запускается на счёт.

Данные о частицах, рождённых в процессе прохождения частиц через вещество детектора, накапливаются во время моделирования очередного события в соответствующем общем блоке. Так как каскад частиц часто бывает очень разветвлённым, то имеется значительная вероятность переполнения этого общего блока. В таком случае избыток частиц переписывается во временный набор данных на диск. Во многих программах (EGS, GEANT и др.) применяется порядок просмотра такого массива характеристик частиц с конца к началу, т.е. последняя рождённая частица рассматривается в первую очередь и её характеристики после этого замещаются характеристиками "дочерних" частиц. Так как в нашем случае информация о всех частицах хранится до конца моделирования события, то у нас применяется более естественный порядок просмотра - от первых частиц к последним. Наличие информации о всех частицах к моменту окончания моделирования события даёт во многих случаях дополнительные возможности.

В программе UNIMOD2 используются три вида подпрограмм, моделирующих процессы, изменяющие состояние частиц.

Первый тип подпрограмм - это моделирование "непрерывных" взаимодействий: ионизационных потерь и многократного рассеяния заряженных частиц на атомах вещества. Непрерывными эти взаимодействия названы потому, что вероятность каждого акта взаимодействия велика, вследствие этого рационально учитывать суммарный эффект этих взаимодействий на некотором отрезке траектории. Программы моделирования ионизационных потерь и многократного рассеяния должны быть написаны по определённым

правилам и ссылки на них должны быть в заказе на счёт.

Следующий тип подпрограмм - моделирование распадов нестабильных частиц. Случайный выбор момента распада частицы полностью определяется временем жизни частицы и не требует написания специальных программ для каждой частицы (осуществляется головной программой). Напротив, моделирование продуктов распада, как правило, специфично для каждого типа исходной частицы. В описании канала распада каждой нестабильной частицы должно быть указано имя программы, моделирующей характеристики продуктов распада.

Еще один тип подпрограмм моделирует взаимодействия, которые, в отличие от ранее введённых "непрерывных", можно назвать "точечными". Эти программы имеют два режима работы: в первом режиме они должны выдавать головной программе вероятность данного типа взаимодействия на единицу длины траектории частицы, во втором режиме - генерировать характеристики продуктов взаимодействия. Точка взаимодействия выбирается случайно в соответствии с суммой вероятностей взаимодействия по всем процессам, затем в точке взаимодействия выбирается случайно процесс взаимодействия с вероятностью, пропорциональной вероятности взаимодействия на единицу длины траектории. Когда процесс выбран, происходит обращение к соответствующей программе во втором режиме.

Траектория заряженных частиц представляет собой ломаную линию, отрезки которой при отсутствии магнитного поля - прямолинейные, а при наличии магнитного поля представляют собой отрезки спирали. В точках излома производится учёт суммарного эффекта "непрерывных" взаимодействий: уменьшение энергии за счёт ионизационных потерь и изменение направления движения за счёт многократного рассеяния.

В точке остановки заряженных частиц возможен еще один тип взаимодействия - в покое. Для каждого типа частицы можно в заказе на счёт указать имя программы моделирования взаимодействия, которая будет вызвана в точке остановки частицы для генерации продуктов взаимодействия.

Программы такого типа, заменяющие или дополняющие стандартные, следует писать в точном соответствии с имеющимися правилами, сформулированными для каждого типа программ.

Для повышения точности моделирования процессов при меняющейся

непрерывно энергии рассматриваемой частицы для всех процессов введена возможность выставить флаг "ложное взаимодействие" в режиме генерации характеристик продуктов взаимодействия. Ненулевое значение этого флага при выходе из программы моделирования взаимодействия означает для головной программы, что исходная частица осталась неизменной и может продолжать движение, если моделировалось взаимодействие "на лету". Если такой флаг установлен программой нестандартного взаимодействия в остановке, то в этом случае анализируется возможность распада (для нестабильной частицы).

Такой приём для повышения точности моделирования при условии меняющейся энергии частицы является реализацией метода выравнивания сечения, впервые опубликованного в [6], однако задолго до этого использовавшегося фон Нейманом. Формальное описание этого метода можно найти в [7], а также в Приложении 2 в [1].

Быстро-переменное поведение сечения взаимодействия может быть не только из-за потерь энергии частицей, но и за счёт слоистого вещества, например, когда тонкие слои разных веществ следуют друг за другом. Для моделирования прохождения частиц через такие системы в UNIMOD2 можно пользоваться стандартным подходом, последовательно проведя частицы через каждое вещество. Кроме того, существует возможность использования метода выравнивания сечения.

Таким образом, в программе UNIMOD2 реализовано два способа розыгрыша пробега до точки взаимодействия. При первом способе вероятности взаимодействий вычисляются только для того вещества, в котором находится частица в данный момент. Затем происходит смещение частицы в точку взаимодействия, но если по дороге встречается граница блока раньше точки взаимодействия, то на границе делается остановка, вычисляется вероятность взаимодействия для вещества другого блока, и розыгрыш пробега производится заново.

При втором способе розыгрыша взаимодействия в качестве вероятности взаимодействия выбирается максимальная вероятность по всем блокам. В соответствии с этой завышенной вероятностью генерируется пробег, и теперь розыгрыш пробега на каждой границе блока не производится вплоть до точки взаимодействия. А в точке

взаимодействия принимается (случайно) решение, что взаимодействие действительно произошло, с вероятностью, равной отношению действительной вероятности взаимодействия в этой точке при текущих параметрах частицы в данном веществе к вероятности, использованной для розыгрыша пробега. Если принимается решение, что взаимодействие не произошло, то движение частицы продолжается.

Пользователь в заказе для каждого блока вещества отмечает, какой способ розыгрыша пробега (1 или 2) должен использоваться для нейтральных и заряженных частиц.

В главе 4 приводится краткое физическое описание подпрограмм моделирования процессов, реализованных в программе UNIMOD2. Цитирование формул сведено к минимуму там, где можно сослаться на оригинальные работы, а также на препринты с описаниями предыдущих версий программ моделирования в нашем Институте [1, 8, 9].

Готовый к использованию файл описания этих программ, составленный по правилам интерпретатора ввода UNIMOD2, имеется на общем диске. Поэтому разбираться детально в правилах написания программ моделирования взаимодействия и включения их в заказ на счёт необходимо только в том случае, когда требуется модифицировать имеющуюся программу взаимодействия или добавить новое взаимодействие частиц с веществом.

Простые примеры использования программы UNIMOD2 в немагнитном и магнитном вариантах записаны в файлах TESTUN1 и TESTUN2 (тип DATA) на общедоступном диске для пользователей ИЯФ СО АН СССР.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ e^+e^- АННИГИЛЯЦИИ

Генерацию первых частиц в моделировании события выполняют программы первичного моделирования. Функция такой программы состоит в моделировании для каждой первичной частицы её параметров: типа частицы, энергии, векторов положения, направления движения и поляризации. Эти параметры заносятся в общий блок и далее пересылаются в буфер частиц.

В отличие от программы UNIMOD1 в новой версии возможно последовательное включение нескольких программ первичного моделирования. При моделировании событий e^+e^- аннигиляции этими можно пользоваться для более полного учёта эффектов встречи.

Например, сначала можно разыграть координаты точки взаимодействия, полную энергию системы e^+e^- и её импульс в лабораторной системе отсчёта, используя данные из заказа на счёт о размерах области взаимодействия и разбросе энергии в пучке. Далее можно учесть излучение начальными частицами (радиационные поправки). Кроме изменения параметров системы центра масс e^+e^- этот эффект может приводить к рождению дополнительных частиц: фотонов, e^+e^- пар и др. Формулы для моделирования спектров и угловых распределений фотонов приведены в работах [10, 11]. Окончательно, в системе центра масс e^+e^- можно разыграть изучаемый процесс e^+e^- взаимодействия.

Для моделирования процессов с тремя и более конечными частицами удобно воспользоваться методом случайных звёзд, предложенным Г.И. Копыловым [12] и дающим хорошую эффективность моделирования, если квадрат матричного элемента не имеет сингулярностей. В некоторых случаях, когда одно и то же конечное состояние может достигаться различными способами (например, $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ могут образовываться через промежуточные механизмы $\omega\pi^0$, $a_1(1260)\pi$, $\rho\pi\pi$ и т.д.), целесообразно моделировать рождение конечных частиц по фазовому объёму, а дальнейшую отбраковку, соответствующую матричному элементу конкретного механизма, осуществлять при обработке событий.

На программы первичного моделирования возлагается работа по вычислению сечения регистрации. Для этого в специально отведенной ячейке памяти накапливается сумма величин, обратных интегралу от дифференциального сечения по фазовому объёму (если он известен) в каждом событии. Отношение числа зарегистрированных событий к этой сумме даёт сечение регистрации этих событий. Если программа первичного моделирования не производит такого суммирования, то сечение регистрации придётся определять вне рамок программы UNIMOD2.

4. ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ С ВЕЩЕСТВОМ

4.1. Рождение пар в поле ядра

Полные сечения процесса взяты из [13]. Для моделирования рождения пар используются дифференциальные сечения [14]. Процесс моделируется для атомного номера в интервале $1+94$, энергии фотона от $2 \cdot m_0c^2$ до 10^6 МэВ. Подробно моделирование рождения пар описано в [9].

4.2. Тормозное излучение

Для моделирования процесса используются дифференциальные спектры, полученные в работах [15,16]. Атомный номер вещества в интервале $1 + 92$, энергия начальной частицы 1 кэВ + 10000 МэВ. Моделирование тормозного излучения подробно описано в [9].

4.3. Комптон-эффект и Рэлеевское рассеяние

Для моделирования неупругого рассеяния фотонов используются полные сечения [13,17,18] и дифференциальное сечение (для свободных электронов). Для моделирования упругого рассеяния используются полные сечения [13] и дифференциальные сечения [19]. Атомный номер в интервале $1+94$ [20]. Алгоритмы моделирования обоих процессов изложены в [9].

4.4. Фотоэффект

Для моделирования используются полные сечения [13]. Описание алгоритма моделирования процесса содержится в [9]. Атомный номер вещества в интервале $1+94$.

4.5. Ионизационные потери

Моделирование процесса непрерывных ионизационных потерь по сравнению с первой версией UNIMOD [1] было существенно переработано. Средняя величина потерь тяжёлой заряженной частицы на единице пути, затраченная на возбуждение и ионизацию атомов вещества с энергией вторичных частиц меньше η , теперь вычисляется по формуле:

$$-E/dx = \frac{4\pi\alpha^2\rho Z}{mM_{at}A\beta^2} \left(\ln\left(\frac{2mc^2\beta^2\gamma^2}{I}\sqrt{r}\right) - \frac{\beta^2}{2}(r+1) - \frac{\delta}{2} - \frac{1}{Z}\sum_1 C_1 \right) \quad (4.5.1)$$

где ρ - плотность вещества (г/см^3), Z , A - атомный номер и вес вещества, I - средний ионизационный потенциал среды (кэВ), δ - поправка на эффект плотности, $\sum_1 C_1$ - оболочечная поправка, $r = \min(\eta/\epsilon_m, 1)$, $\epsilon_m = 2mc^2\gamma^2\beta^2$ - максимально возможная передача энергии, M_{at} - атомная единица массы.

Поправка на эффект плотности δ даётся формулой из работ Штернхеймера [21]. Она вызвана поляризацией среды вдоль пути ультрарелятивистской частицы.

$$\delta = \begin{cases} 0 & , x < x_0 \\ 4.606 x + B + a \cdot (x_1 - x)^3 & , x_0 < x < x_1 \\ 4.606 x + B & , x > x_1 \end{cases} \quad (4.5.2)$$

где $B = -2 \cdot \ln\left(\frac{I}{h\nu_p}\right) - 1$, $\nu_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\pi m}}$ - плазменная частота, n - число электронов в 1 см^3 вещества, $a = 4.606 \cdot (x_a - x_0)^3$, $x_a = -B/4.606$, $x = \ln(\beta\gamma) / 2.303$.

Для $I < 100$ эВ : $x_1 = 2$,

1) $x_0 = 0.2$, если $-B < 3.681$, 2) $x_0 = -0.326 \cdot B - 1$, если $-B > 3.681$.

Для $I > 100$ эВ : $x_1 = 3$,

1) $x_0 = 0.2$, если $-B < 3.681$, 2) $x_0 = -0.326 \cdot B - 1.5$, если $-B > 3.681$.

Поправки C_1 учитывают связь электронов на K, L... оболочках, они играют роль для нерелятивистских и слабoreлятивистских частиц. Для $\sum_1 C_1$ существуют полуэмпирические формулы [22] в некотором диапазоне энергий для всех веществ:

$$\sum_1 C_1(\tau, I) = (0.42237 \cdot \tau^{-2} + 0.304 \cdot \tau^{-4} - 0.00038 \cdot \tau^{-6}) \cdot I^2 + (3.858 \cdot \tau^{-2} + 0.1668 \cdot \tau^{-4} + 0.00158 \cdot \tau^{-6}) \cdot I^3 \quad (4.5.3)$$

где $\tau = \beta\gamma$. Такую формулу можно применять, начиная с $\tau_c^2 = 0.15$, при $\tau < \tau_c$ положим $\sum_1 C_1(\tau, I) = \sum_1 C_1(\tau_c, I)$.

Для моделирования флуктуаций ионизационных потерь получена функция распределения с учётом порога по энергии. Она сводится к формуле Вавилова [23] с переопределёнными параметрами. При $k \ll 1$ ($k = \frac{\pi r e^2 \rho Z \cdot (1 - \beta^2) x}{M_{at} A \beta^4}$) оно превращается в распределение Ландау [24],

а при $k \gg 1$ стремится к гауссову. Способ получения этой

универсальной функции распределения и её аппроксимация сплайном специального вида описан в работе [25].

Формулы для подпороговых ионизационных потерь электронов и позитронов получаются интегрированием сечений Мёллера и Баба [26]. Флуктуации моделируются по тому же распределению, что и у тяжёлых частиц, только с другим образом переопределёнными параметрами, обеспечивающими и в этом случае правильное среднее и дисперсию.

Кроме того, к непрерывным потерям отнесены потери на излучение мягких фотонов, которые не учитывались в предыдущей версии. Теперь потери энергии электронов и позитронов на излучение фотонов с $\omega < \eta_\gamma$ добавляются к непрерывным ионизационным потерям. Спектр мягких фотонов $\frac{d\sigma}{d\omega}$ приблизительно пропорционален $1/\omega$, поэтому средние потери равны:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{M_{at} A} \eta_\gamma^2 \frac{d\sigma}{d\omega}(\eta_\gamma) \quad (4.5.4)$$

Сечение $\frac{d\sigma}{d\omega}(\eta_\gamma)$ берётся из подпрограммы, описывающей дискретные события тормозного излучения, (см. п.4.2).

Для флуктуаций этих потерь получена функция распределения:

$$\frac{dP}{d\xi} = \int_{a-i\omega}^{a+i\omega} \frac{dz}{2\pi i} e^{\xi z - \bar{\xi}(\varphi(z)+C)} \quad (4.5.5)$$

где $\xi = \frac{\Delta E}{\eta_\gamma}$, $\bar{\xi} = \frac{\Delta \bar{E}}{\eta_\gamma}$, $\varphi(z) = \int_0^z \frac{1 - e^{-x}}{x} dx - C$, $C = 0.577$ - постоянная Эйлера. Дисперсия этого распределения: $\overline{\Delta \xi^2} = \bar{\xi}/2$; при $\bar{\xi} \ll 1$ оно переходит в $\bar{\xi}/\xi^{1-\bar{\xi}}$, а при $\bar{\xi} \gg 1$ - в гауссово распределение. Моделирование этого двухпараметрического распределения также производится при помощи аппроксимации сплайном.

4.6. Аннигиляция позитронов

Для моделирования используется полное сечение [17] и дифференциальное сечение [20]. Алгоритм моделирования изложен в [9].

4.7. Рассеяние заряженных частиц на электронах атомов

Рассеяние заряженных частиц на электронах атомов моделируется с помощью алгоритма, описанного в [9].

4.8. Многократное рассеяние

Процесс многократного рассеяния заряженных частиц на атомах вещества моделируется способом, описанным в [1], в соответствии с теорией Мольера и Бете [27]. Единственное техническое отличие состоит в том, что функции $F^{(1)}$ в интегральном распределении (см. [1]) раньше представлялись быстросходящимися рядами, а теперь эти ряды интерполируются сплайном [25], что экономит время счёта. Все обозначения здесь те же, что и в [1]. Используемые разложения по-прежнему имеют смысл при $B \gg 1$, что выполняется в слоях с толщиной больше 1 г/см^2 .

4.9. Распады нестабильных частиц

При моделировании распадов нестабильных частиц применяется тот же подход, что и в [1]. Феноменологические константы в матричных элементах взяты из [28].

4.10. Распады и взаимодействия остановившихся частиц

В результате ионизационных и радиационных потерь в веществе, заряженные частицы теряют свою кинетическую энергию и могут практически остановиться. При этом отрицательно заряженные частицы могут быть захвачены атомными ядрами вещества, позитроны аннигилируют с электронами, а нестабильные положительно заряженные частицы распадаются.

В программе UNIMOD2 предусмотрена возможность подключения программ моделирования процесса остановки заряженной частицы. Если пользователь не включает такую программу для стабильной частицы, то она просто пропадает, для нестабильной частицы моделируется распад. В библиотеке UNIMOD2 имеются программы моделирования остановок следующих частиц: e^+ , μ^- , π^- , K^- , \bar{p} .

В программе моделирования остановки e^+ моделируется реакция $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ со сферически симметричным вылетом фотонов. При моделировании остановки μ^- определяется скорость захвата μ^- данным веществом согласно данным обзора [30], затем случайным

образом выбирается один из двух процессов - захват ядром или распад в покое. Если выбран захват, то моделируется вылет из ядра одного нейтрона и энергия возбуждения ядра в реакции $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$. Если выбран распад, то выставляется флаг ложного взаимодействия и управление передается головной программе, которая в свою очередь вызывает программы моделирования распада. Взаимодействие отрицательно заряженных адронов осуществляется по программе NUCRIN [31,32], при этом могут рождаться вторичные энергичные частицы и появляется энергия возбуждения среды. Вероятность поглощения адрона полагается равной 100%.

4.11. Ядерные взаимодействия адронов

В библиотеке программ имеется пакет программ моделирования взаимодействия адронов с ядрами атомов NUCRIN86, который включает в себя программы упругого и неупругого ядерного взаимодействия. Неупругое взаимодействие моделируется по программе NUCRIN [31,32] для следующих адронов: π^\pm , p , \bar{p} , n , \bar{n} , K^\pm , K_L , K_S , Λ^0 , Σ^\pm , Σ^0 , Ξ^0 , Ξ^- . Следует отметить, что программа NUCRIN допускает произвольные значения импульсов налетающих адронов, однако её рекомендуется использовать для адронов с импульсом $0.1 \text{ ГэВ/с} < P < 5 \text{ ГэВ/с}$. В результате моделирования генерируются вторичные частицы, вылетающие из ядра, часть энергии выделяется в виде возбуждения среды. Упругое взаимодействие моделируется для тех же адронов по программе NUCREL, интервал допустимых импульсов в этом случае значительно шире. Частица, испытавшая упругое рассеяние, записывается в буфер вторичных частиц, её энергия не меняется.

4.12. Взаимодействие частиц со сложными веществами

В UNIMOD2 предусмотрена возможность моделирования прохождения частицы через среду, состоящую из различных атомов. Если пользователь при вводе данных объявил вещество данного блока сложным, он должен задать атомные параметры компонент вещества и плотность каждой компоненты. Программа вычисляет эффективные параметры смеси согласно алгоритму, подробно описанному в [1]. Далее по желанию пользователя возможны два варианта моделирования.

В первом варианте для моделирования пробега частицы используются эффективные параметры смеси, во втором - эффективные параметры используются только для моделирования ионизационных потерь и многократного рассеяния заряженных частиц, а все остальные процессы взаимодействия частиц с веществом моделируются отдельно для каждой из компонент. Продукты взаимодействия моделируются всегда на атомах одного из компонентов.

5. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРОГРАММЫ И УЧЁТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В программе UNIMOD2 важное значение имеют геометрические программы, т.е. те программы, которые анализируют возможность пересечения траектории частицы с поверхностью каждого блока вещества детектора. В настоящее время написано несколько таких подпрограмм, которые необходимы для моделирования строящихся детекторов СНД и КЕДР. Новые программы для анализа других блоков могут быть легко активизированы путем включения их в общий числовой массив описаний или в заказ на конкретный вариант счёта. Однако, при создании новых геометрических программ следует быть очень осторожным, так как ошибки в этих программах плохо идентифицируются и, в лучшем случае, могут приводить к заикливанию или к идентифицируемой ошибке, а в худшем - к неправильным результатам.

Головная программа использует геометрические подпрограммы в трёх режимах:

- 1) Определить, находится ли данная частица внутри данного блока. Возможны ответы: внутри или снаружи.
- 2) Определить расстояние до ближайшего пересечения с поверхностью блока в случае, когда известно, что частица находится внутри. Заданы ограничения на искомое расстояние снизу и сверху. Если пересечение с поверхностью находится ближе минимального расстояния, то считается, что это пересечение уже пройдено и надо искать следующее пересечение. Если расстояние до пересечения превышает верхний предел, то точное значение расстояния не требуется. Возможные ответы подпрограммы:
 - а) неправильно предположение о нахождении частицы внутри объёма,
 - б) частица действительно внутри и вычислено расстояние до

пересечения в пределах ограничений снизу и сверху,
в) частица действительно внутри объёма и расстояние превышает ограничение сверху.

- 3) Определить расстояние до ближайшего пересечения с поверхностью блока вдоль траектории частицы в случае, когда известно, что частица находится снаружи объёма. Заданы ограничения на искомое расстояние снизу и сверху, правила использования такие же, как во втором пункте. Возможные ответы подпрограммы:
 - а) неправильно предположение о нахождении частицы снаружи блока,
 - б) частица действительно снаружи и вычислено расстояние до пересечения в пределах ограничений снизу и сверху,
 - в) частица действительно снаружи блока и расстояние превышает ограничение сверху.

При разработке геометрических программ для СНД оказалось возможным описать сложные геометрические фигуры набором простых поверхностей: плоскость, шар, цилиндр, конус. Такие геометрические программы имеют однотипную, достаточно простую внутреннюю структуру, что увеличивает их надёжность ценой проигрыша во времени счёта.

Одни и те же программы используются для анализа пересечения траектории частицы с блоками вещества и с границами областей пространства, для которых есть описание магнитного поля (в описаниях UNIMOD2 такие области пространства названы для краткости отсеками).

В программе UNIMOD2 учёт влияния магнитного поля на движение заряженных частиц производится в приближении кусочно-однородного поля. Это означает, что на протяжении очередного перемещения частицы магнитное поле считается однородным и равным значению напряжённости поля в начальной точке отрезка траектории. Естественно, такой способ учёта приводит к неточности в случае сильно неоднородного поля. Для повышения точности расчёта траектории в магнитном поле можно ограничивать сверху величину элементарного перемещения частицы в магнитном поле, при этом точность учёта магнитного поля повышается за счёт увеличения времени счёта. Так как перемещение частицы в пространстве производится головной программой, то для использования какого-либо другого алгоритма расчёта траектории частицы

необходимо переделывать головную программу, что в настоящее время не планируется.

6. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ ДЕТЕКТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ПРОХОЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ НИХ

Моделирование работы счётчиков, проволочных камер и др. детектирующих устройств является довольно сложной задачей, причём работа даже однотипных устройств в разных детекторах часто различается, если стремиться к точности моделирования порядка процента.

Реакция большей части детектирующих устройств определяется сложными процессами, протекающими в этих устройствах при пересечении их частицами. В тех случаях, когда приемлема упрощённая модель работы какого-либо типа устройств, можно ограничиться стандартными программами моделирования сцинтилляционных счётчиков, проволочных камер и т.д.

В большинстве случаев для обработки результатов реального детектора необходимо будет написать свои программы моделирования реакции детектирующего устройства на основе информации, имеющейся в данный момент в общих блоках UNIMOD2. Естественно, в своей программе моделирования реакции устройства на прохождение частицы можно не придерживаться правил, рекомендованных для стандартных программ. Можно вводить свои личные общие блоки, записывать или считывать с диска информацию и т.д. В любом случае, однако, необходимо прочитать инструкцию по написанию стандартной программы моделирования счётчика или камеры, прежде чем приступить к написанию своего варианта программы.

В программе UNIMOD2 вводится понятие счётчика и проволочной камеры, которые различаются исходной информацией и форматом записи выходной информации. Формальное основное отличие камеры от счётчика в том, что каждая "проволочка" является детектирующим устройством, для неё есть понятие "срабатывание" и факт такого срабатывания может отмечаться головной программой в специально отведённом для этого массиве "да-нет"-ной информации.

Для методических расчётов в комплекте UNIMOD2 имеются стандартные программы упрощённого моделирования амплитуды в сцинтилляционных счётчиках и срабатывания проволочных камер.

7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРИГГЕРА

В программах моделирования эксперимента триггер заключается в принятии решения, записывать ли информацию о данном событии для последующей обработки или нет, а также в моделировании тех блоков электроники, информация с которых предполагается использовать при отборе событий. На практике часто эффективность триггера для "полезных" событий настолько велика, что любые физические условия отбора событий (восстановление какого-либо минимального числа треков в камерах, порог по суммарному энерговыделению в счётчиках и т.п.) надёжно включают в себя условия триггера, которые использовались в эксперименте для записи событий на магнитную ленту. В этом случае каждое событие моделирования можно использовать для последующего анализа.

В некоторых случаях нет уверенности, что условия триггера перекрываются условиями отбора событий, которые используются для выделения нужной реакции. Тогда триггер необходимо моделировать. Естественно, это можно сделать в своей собственной подпрограмме, используя информацию из общих блоков программы UNIMOD2, по тому алгоритму, который кажется наиболее привлекательным.

В случае сложной схемы запуска системы регистрации можно пытаться во избежание ошибок моделировать триггер как можно ближе к оригиналу, т.е. моделировать логические операции (совпадение, антисовпадение, логическое суммирование и т.д.). Для этого в программе UNIMOD2 имеются возможности описывать подпрограммы, моделирующие работу какого-либо блока электроники.

Все блоки электроники по типу входной информации разбиваются на два класса: "дискриминаторы", для которых входной информацией являются "амплитуды", и блоки электроники, выполняющие действия логической алгебры. Названия "дискриминаторы" и "амплитуды" - условные, так как на входе этих блоков может быть любая аналоговая информация, связанная с пересечением счётчика частицей, например, время пересечения. Все блоки электроники имеют один выходной параметр, принимающий значение в данном событии 0 или 1 ("не сработал" или "сработал").

Программы, имитирующие работу блоков электроники, а также схема запуска должны быть описаны по правилам интерпретатора ввода в вышеуказанных разделах. Учёт работы схемы запуска,

включение информации о срабатывании блоков электроники в посылки для записи на магнитную ленту (если она производится) целиком определяется программами пользователя и головной программой не регламентируется.

Простейшие операции могут быть выполнены стандартными программами, имеющимися в библиотеке программ UNIMOD2. В этом случае потребуется только включить во входной поток данных массив описания программ логической электроники и описать схему запуска.

8. ВВОД НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ

При проектировании интерпретатора ввода были заложены следующие принципы:

- 1) Входной поток данных должен быть единым, без каких-либо обязательных подразделений на отдельные файлы, в то же время должна быть возможность в любом месте вставить в текст какой-либо файл. Такая организация позволяет свободно комбинировать стандартные файлы описаний со своими личными. Включённый таким образом во входной поток файл может содержать ссылки на другие файлы, однако по техническим причинам глубина такой вложенности ограничена тремя уровнями. Для большинства задач такие условия представляются достаточными.
- 2) Во входном потоке различаются разделы информации, которые никак не связаны с разбиением входных данных на файлы. Каждый раздел начинается служебной строкой, первые две позиции которой заняты символами "***", за которыми следует кодовое слово. Порядок следования разделов друг за другом не регламентирован, однако, всегда должно выполняться правило, что ссылка на другой элемент описания (по имени) возможна только в том случае, когда это имя описано ранее во входном потоке.

Любой раздел может начинаться неоднократно, при этом новая информация добавляется к старой.

- 3) Форматированная распечатка входной информации производится по командам, вставляемым во входной поток. Команда печати представляет собой служебную строку, начинающуюся символом "\$" (доллар), за которым следует кодовое слово. Кодовые слова, как правило, совпадают с кодовыми словами разделов, однако,

имеются и отличия. Следует помнить, что печать производится немедленно, сразу после того, как встретится команда печати, поэтому необработанная часть входного потока не будет отражена в напечатанной информации.

- 4) Ссылки на какие-либо элементы заказа производятся только по именам.
- 5) Запись числовой информации неформатная, разделителем является запятая или конец строки. Перенос на другую строку производится без каких-либо дополнительных символов, однако имена и числа не должны разрываться. При вводе обрабатываются только первые 72 позиции строки, остальные игнорируются.

Какая-либо дополнительная информация, необходимая для программ пользователя, должна вводиться средствами пользователя.

Вывод информации в программе UNIMOD2 предполагается двух видов: стандартизованный и нестандартный.

Под стандартизованной информацией подразумевается вывод гистограмм распределений событий по каким-либо параметрам. Гистограммная часть комплекса UNIMOD2 в большой степени совпадает с гистограммной программой, подробно описанной в [5].

Моделирование реального эксперимента со сложным детектором, как правило, сопровождается записью на магнитные ленты информации о событиях, причём структура записей обычно близка к записям экспериментальной информации. Организация таких специфических записей выходит за пределы компетенции программы UNIMOD2 и должна организовываться программами пользователя. Для формирования записей можно использовать информацию из общих блоков.

Может так оказаться, что не вся необходимая информация о текущем событии сохраняется по окончании события. В этих случаях следует вставлять соответствующие программы формирования записей в дополнительные точки программы в соответствии с описанием.

9. СРЕДСТВА ОТЛАДКИ

Отладка программы в применении к UNIMOD2 включает несколько типовых ситуаций. Обсудим средства, рекомендуемые в каждой из них.

Наиболее типичный случай - подготовка новой подпрограммы, которую надо включить в общее пользование. Сюда же относится и модификация старой программы, которая уже используется. Для

подмены подпрограммы или включения новой программы в сборку достаточно иметь ссылку на неё в соответствующем месте входного потока и объектный модуль этой программы на диске с модой А. Программы, имеющиеся на диске А и не объединённые в библиотеку, имеют преимущество перед стандартными подпрограммами при включении в сборку. Это создает максимальные удобства для отладки подпрограмм в интерактивном режиме, однако, по этой причине возникает опасность несанкционированного включения посторонних программ вместо стандартных. При использовании UNIMOD2 следует проверять имена объектных модулей, имеющихся на диске А, и в случае совпадения имён удалять свою программу.

Большинство программ в UNIMOD2 имеют вид UMnnnn, где последние четыре символа являются цифрами, однако, есть и отклонения от этого правила. В случае возникновения подозрения на совпадение имён следует по окончании счёта UNIMOD2 просмотреть список программ в файле LOAD MAP А, где содержится протокол сборки.

Другая типичная ситуация - проверка возникшего подозрения на неправильный результат моделирования. Кроме проверки глобальных характеристик - распределений событий по каким-либо параметрам, - в сложных случаях возникает желание посмотреть некоторую дополнительную информацию о каждом событии.

В настоящий момент реализовано несколько уровней отладочной печати, выбираемых командой PRINT в разделе входного потока данных под кодовым названием РЕЖИМ.

Она имеет четыре уровня:

PRINT:0

PRINT:1

PRINT:2

PRINT:3

По умолчанию - PRINT: 0. Нижний уровень 0. Верхние уровни включают в себя нижние.

0 уровень: нет печати.

1 уровень: - Номер события

- Исходное случайное число

- Параметры начальных частиц: тип, энергия, положение, орт скорости, вектор поляризации

- Ненулевые амплитуды в счётчиках; если нет ненулевых амплитуд, то информация не выводится

(число величин совпадает с числом параметров программы, моделирующей амплитуды со счётчиков)

- Дискриминаторы: имя дискриминатора и его выход (0 или 1). Если дискриминаторы не описаны, то информация не выводится.

- Блоки логической электроники: имя блока и его выход (0 или 1). Если блоки не описаны, то информация не выводится.

- Ненулевые амплитуды в камерах. Если нет ненулевых амплитуд, то информация не выводится (число величин совпадает с числом параметров программы, моделирующей амплитуды с проволочных камер)

- Количество сработавших проволочек. Если нет сработавших проволочек, то информация не выводится

2 уровень:

В начале жизни частицы:

- Её номер

- Номер родителя

- Её параметры: тип частицы, энергия, положение, орт скорости, вектор поляризации

В конце жизни:

- Параметры частицы: тип, энергия, положение, орт скорости, вектор поляризации

- Причину смерти частицы или номер и название программы, которая отвечает за процесс взаимодействия (эти программы при первом к ним обращении печатают название обслуживаемого ими процесса, если это стандартные программы).

3 уровень:

На каждом перемещении частицы:

- Параметры частицы: тип, энергия, положение, орт скорости, вектор поляризации

В тех случаях, когда подозрение в неправильной работе программы UNIMOD2 укрепилось, прежде, чем обращаться к авторам программы, полезно с помощью отладочной печати уровня 1 определить исходное случайное число события, в котором замечен

сбой. Кроме сокращения времени процессора, необходимого для достижения сбоя, такой повторный счёт даст информацию об устойчивости этого сбоя.

Конечно же, в необходимых случаях, кроме стандартной отладочной печати, можно организовывать свои распечатки с помощью дополнительных подпрограмм, включаемых в соответствующие точки программы во входном потоке данных.

10. СРАВНЕНИЕ РАСЧЁТОВ ПО ПРОГРАММЕ UNIMOD2 С ДРУГИМИ ДАННЫМИ

Результаты моделирования можно сравнивать с расчётами по другим программам и с экспериментальными данными. Как правило, согласие с экспериментом является лучшим критерием правильности программы. Однако, различие может объясняться не ошибками программы, а тем, что не учтены какие-то физические эффекты.

Ниже приводятся результаты сравнения для моделирования электромагнитных ливней по нашей программе с другими данными, расчётными и экспериментальными.

1. На рис.1 приводится энерговыделение в цилиндрическом блоке алюминия. Длина блока 10 см, радиальный размер указан на рисунке. В каждом канале гистограммы и точке расчёта приводится величина выделяемой энергии в процентах от начальной. Гистограмма - эксперимент [33], выполненный с электронами с энергией 1 ГэВ, моделирование проводилось при тех же условиях, на рисунке результаты UNIMOD2 изображены чёрными кружками.

Как видно из рисунка, наблюдается хорошее согласие. Ранее проводилось сравнение и старой версии программы UNIMOD [1] с этим экспериментом (чёрные квадратики на рисунке). Видно, что результаты практически не изменились. Это говорит о том, что в условиях толстых слоёв вещества и больших энергий новая версия программы эквивалентна старой.

2. На рис.2а показано одно отличие новой версии программы от старой, которое проявляется при моделировании энерговыделения в тонких слоях вещества. Рассматривается выделение энергии в слое 2 мм свинца от пучка электронов с энергией 500 МэВ. Старая версия программы давала распределение Гаусса с некоторым "хвостом", распределённое вокруг правильного среднего (в данном случае 3.41 ± 0.037 МэВ). Учёт ионизационных потерь по модифицированной

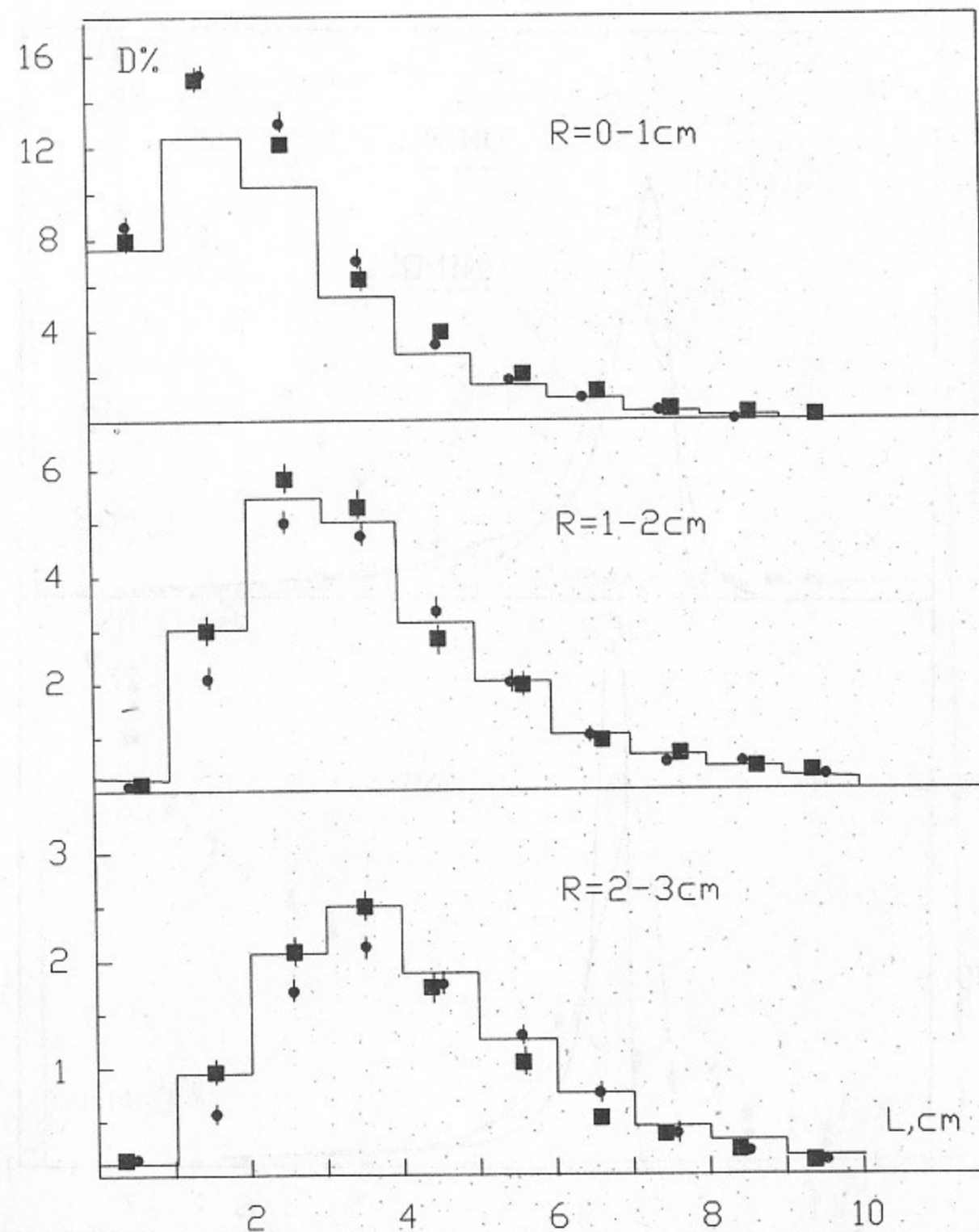


Рис.1 Энерговыделение в цилиндрическом блоке алюминия (длина блока 10 см, радиальный размер указан на рисунке) от пучка электронов с энергией 1 ГэВ. Выделяемая энергия отложена в процентах от начальной. Гистограмма - эксперимент [33], чёрные кружки - результаты моделирования UNIMOD2, чёрные квадратики - результаты моделирования на старой версии программы UNIMOD [1].

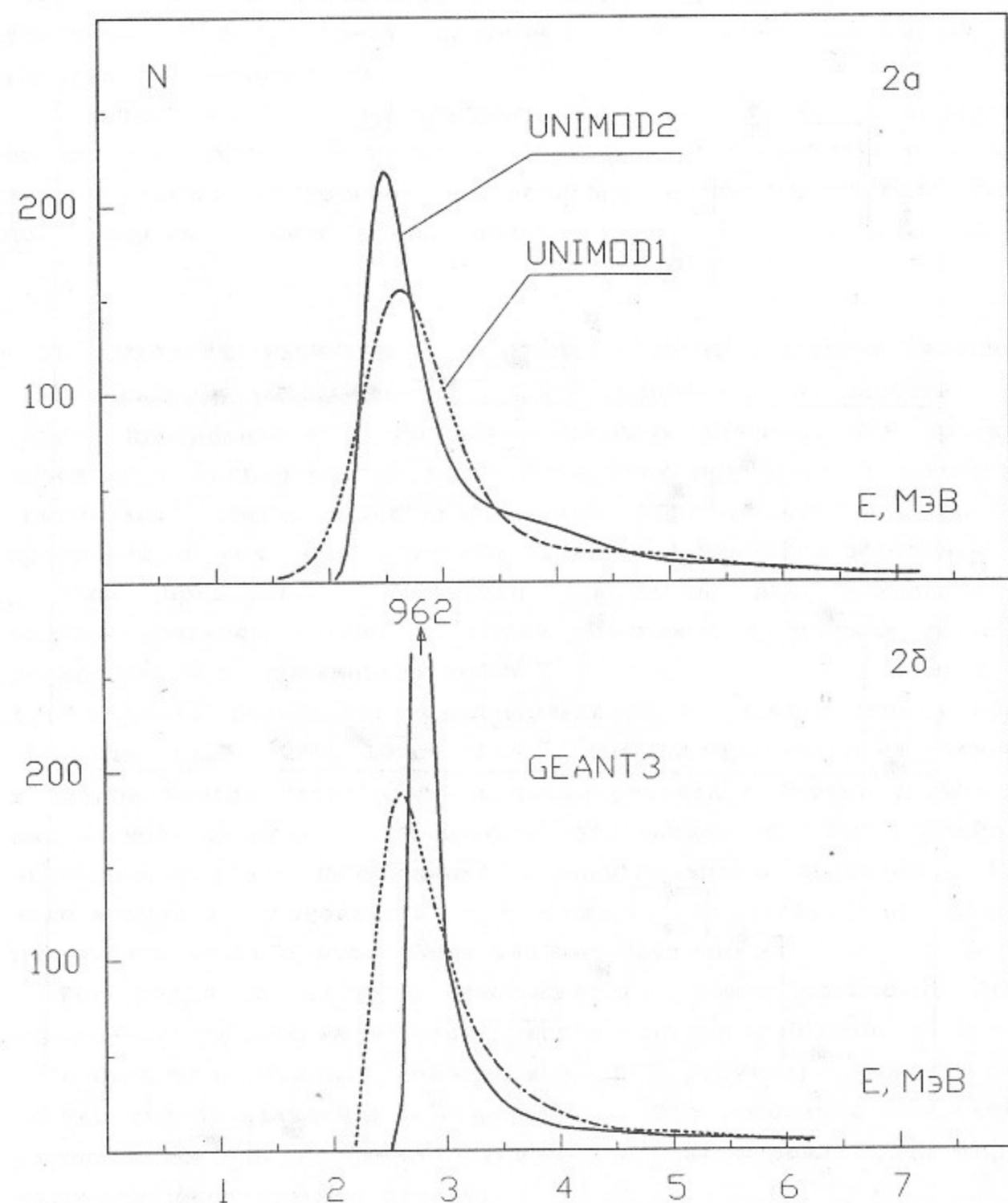


Рис.2 а) Энерговыведение в слое 2 мм свинца от пучка электронов с энергией 500 МэВ. Старая версия программы UNIMOD1 - пунктирная линия, средняя энергия, выделенная в слое, равна (3.41 ± 0.037) МэВ, UNIMOD2 - сплошная линия, среднее значение потерь равно (3.38 ± 0.033) МэВ.

б) Результаты моделирования того же случая программой GEANT3 (версия 3.10) в двух режимах. Пунктирная линия - ионизационные потери моделируются по распределению Ландау, дельта-электронов нет (среднее равно 3.77 ± 0.035 МэВ). Сплошная линия - ионизационные потери учитываются в среднем, флуктуации за счёт дельта-электронов (среднее равно 3.39 ± 0.37 МэВ).

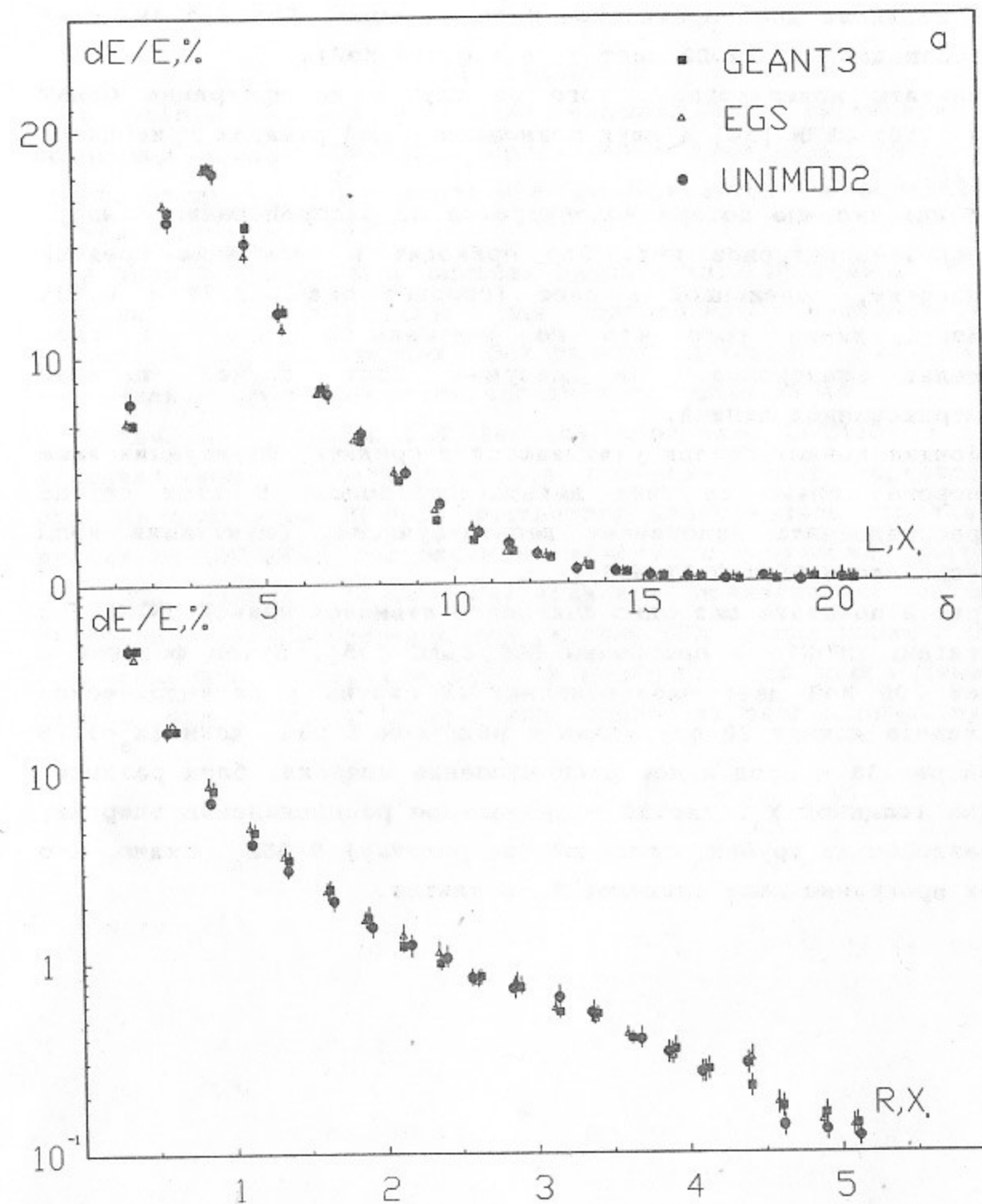


Рис.3. Пучок фотонов с энергией 200 МэВ даёт электромагнитный ливень в цилиндрическом блоке железа длиной 20 рад. длин и радиусом 5 рад. длин. Показано сравнение ливневой кривой UNIMOD2 (кружки) с результатами GEANTa (чёрные квадратики) и программы EGS (треугольники).

а) Продольное распределение энергии, блок разделён на диски толщиной X_0 .

б) Радиальное распределение энергии, блок разделён на трубки толщиной (по радиусу) $0.25X_0$.

функции Вавилова даёт правильное распределение. Средние значения потерь совпадают (UNIMOD2 даёт 3.38 ± 0.033 МэВ).

Результаты моделирования того же случая на программе GEANT (версия 3.10) CERN [34] в двух возможных в ней режимах приводятся на рис.26.

- 1) Ионизационные потери моделируются по распределению Ландау, дельта-электронов нет. Это приводит к завышению средней энергии, выделенной в слое (среднее равно 3.77 ± 0.035 МэВ), из-за того что не учитывается вылет из слоя дельта-электронов. На рисунке этот случай показан штрихованной линией.
- 2) Ионизационные потери учитываются в среднем, флуктуации выше порога только за счёт дельта-электронов. В этом случае распределение напоминает дельта-функцию, флуктуации малы (среднее 3.39 ± 0.37 МэВ).

3. На рис.3 показано ещё одно сравнение ливневой кривой UNIMOD2 с результатами GEANTa и программы EGS SLAC [35]. Пучок фотонов с энергией 200 МэВ даёт электромагнитный ливень в цилиндрическом блоке железа длиной 20 рад. длин и радиусом 5 рад. длин ($X_0=1.76$ см). На рис.3а - продольное распределение энергии, блок разделён на диски толщиной X_0 . Рис.3б - радиальное распределение энергии, блок разделён на трубки толщиной (по радиусу) $0.25X_0$. Видно, что все три программы дают одинаковый результат.

11. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана программа моделирования экспериментов на встречных пучках UNIMOD2. Организация программы допускает её использование для моделирования экспериментов на неподвижной и струйной мишени.

В 1989 году началась опытная эксплуатация программы. В первую очередь она использовалась для подготовки к экспериментам на детекторе СНД (сферический нейтральный детектор) [36], а также выполнялись некоторые методические и тестовые расчёты.

Сравнение с предыдущей версией программы UNIMOD1 и другими данными дало удовлетворительное согласие. Опыт первоначальной отладки программы UNIMOD2 подтвердил качественное отличие новой версии от UNIMOD1, состоящее в гибкости организации программы и исходных данных. Также подтвердились преимущества в отладке программ в рамках операционной системы СВМ по сравнению с ОС.

Несомненно, программа UNIMOD2 претерпит ещё много изменений, однако, эти изменения можно будет проводить эволюционным путём.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Д.Букин и др. UNIMOD - универсальная программа моделирования экспериментов на встречных e^+e^- -пучках. Препринт ИЯФ СО АН СССР 84-33 (1983).
2. С.И.Долинский, В.П.Дружинин и др. Обзор e^+e^- -экспериментов с нейтральным детектором на ВЭПП-2М.
Часть 1. Препринт ИЯФ СО АН СССР 89-68, Новосибирск, 1989.
Часть 2. Препринт ИЯФ СО АН СССР 89-104, Новосибирск, 1989.
3. С.Е.Бару, А.Е.Блинов и др. Детектор МД-1. Препринт ИЯФ СО АН СССР 83-39, Новосибирск, 1983.
4. В.И.Потапов, А.В.Денщикова, О.Б.Шкода. Работа в системе виртуальных машин ЕС. М.: финансы и статистика, 1988.
5. А.Д.Букин, Г.Н.Сковородникова. Программа построения гистограмм для экспериментов по физике высоких энергий. Препринт ИЯФ СО АН СССР 84-158 (1984).
6. P.J.Hemmings. The GEM code, Rep. ANSB (S) R105. London, 1967.
7. И.М.Соболь. Численные методы Монте-Карло.- М: Наука, 1973.- 311 с.
8. А.Д. Букин, С.И. Эйдельман. Препринт ИЯФ СО АН СССР 77-101 (1977).
9. В.А.Таюрский. EMSH - программа расчёта прохождения через вещество электронов и фотонов при энергии 10 кэВ - 1 ТэВ. Препринт ИЯФ СО АН СССР 89-16 (1989).
10. Кураев В.А., Фадин В.С. О радиационных поправках к сечению однофотонной аннигиляции e^+e^- пары большой энергии.- Ядерн.физ., 1985, т.41, вып.3, с.733-742. - Новосибирск, 1984, -12 с.- (Препринт ИЯФ 84-44)
11. Inelastic processes in high energy quantum electrodynamic/
V.N.Baier, V.S.Fadin, V.A.Khoze, E.A.Kuraev. - Phys.Rep., 1981, vol.78, N 3.
12. Г.И.Копылов. Основы кинематики резонансов, М: Наука, 1970.- 487 с.
13. Э.Сторм, Х.Израэль. Сечения взаимодействия гамма-излучения. Москва. Атомиздат 1973.
14. Y.S.Tsai, R.M.PH.46(1974)813.
15. S.M.Seltzer, M.J.Berger, NIM B12 (1985) 95.
16. L.Kissel et al. At. Data and Nucl. Data Tables 28(1983)381.

17. В.Гайтлер. Квантовая теория излучения. Москва. ИЛ 1956.
18. E.Massaro. NIM A251(1986)546.
19. J.N.Hubbel, I.Overbo, J.Chem.Ref.Data. vol.8, N 1 1979.
20. В.Б.Берестецкий и др. Релятивистская квантовая теория. Часть 1. - М: Наука, 1968.-480 с.
21. Sternheimer R.M. Phys.Rev. B3 (1971), 3681.
22. Barkas W.H. UCRL-10292 (August 1962).
23. Вавилов П.В. ЖЭТФ, 1957, т.32, N 4, с.920.
24. Ландау Л.Д. J. of Phys. USSR, 1944, N 8, p.204.
25. Букин А.Д., Грозуна Н.А. Моделирование флуктуаций ионизационных потерь тяжёлых заряженных частиц.- Препринт ИЯФ 87-9. Новосибирск 1987.
26. Берестецкий В.Б. и др. Квантовая электродинамика. Наука, Москва 1980.
27. H.A.Bethe. Phys.Rev. 89 (1953) 1256.
28. Review of Particle Properties, Phys. Letters 204B (1988) p.1.
30. Балашов В.В., Коренман Г.Я., Эрамжан Р.Э. Поглощение мезонов атомными ядрами. -М: Атомиздат, 1978.
31. K.Hanssgen, J.Ranft, Comput. Phys. Commun. 39(1986)37; *ibid* 39(1986)53;
32. А.Д.Букин и др., Препринт ИЯФ 86-18, Новосибирск, 1986.
33. C.J. Crannell, H.Crannell. Phys.Rev.184 (169) 426.
34. R.Brun, F.Bruiant et al. GEANT3 user's guide. CERN DD/EE/84-1 September 1987.
35. R.Brun, M.Caillat, M.Mair et al. The GEANT3 electromagnetic shower program and a comparison with the EGS Code.
36. В.М.Аульченко, В.А.Аксёнов и др. СНД - сферический нейтральный детектор для ВЭПП-2М. Препринт ИЯФ 87-36, Новосибирск, 1987.

А.Д.Букин, Н.А.Грозина, М.С.Дубровин, И.Л.Кац,

В.Н.Иванченко, В.А.Таврский, С.И.Эйдельман

UNIMOD 2 - универсальная программа

моделирования экспериментов на встречных

e^+e^- -пучках

Часть 1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ

Препринт № 90-93

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 23.07.1990 г.

Подписано в печать 31.07.1990 г. МН 08768

Формат бумаги 60x90 1/16. Объем 2.2. печ.л.,

1,8 уч.-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 93

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, Г.Новосибирск, 90