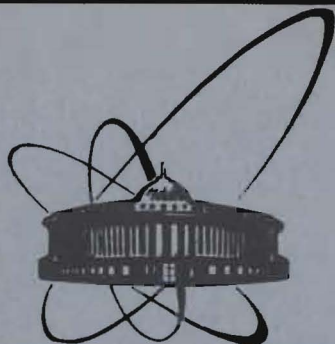


85-173



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

P2 85-173

В.С.Барашенков, Ле Ван Нгок, Л.Г.Левчук,  
Ж.Ж.Мусульманбеков, А.Н.Соснин,  
В.Д.Тонеев, С.Ю.Шмаков

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС "КАСКАД"  
ДЛЯ МОНТЕ-КАРЛОВСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ,  
ИНИЦИИРУЕМЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ  
ЧАСТИЦАМИ И ЯДРАМИ В ГАЗООБРАЗНЫХ  
И КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ**

Направлено в сборник "Предметное  
математическое обеспечение"

**1985**

Необходимость моделирования процессов, реализующихся в небольших мишенях и протяженных средах под действием потоков высокоэнергетических ядерно-активных частиц/пи-мезонов, нуклонов, ионов различных ядер/ возникает при решении "чисто физических" проблем, связанных, например, с восстановлением характеристик ядерных взаимодействий по данным об атмосферных ливнях, с расчетами эффективности детектирующих устройств и определения критериев отбора определенных типов ядерных реакций, а также во многих задачах прикладного характера, касающихся расчетов радиационной защиты ускорителей и космических аппаратов, оценки радиационной обстановки на различных глубинах в атмосфере, расчете тепловыделения и накопления различных изотопов в делящихся и неделящихся мишенях, космохимических задач и так далее.

В целом распространение пучка высокоэнергетических частиц в веществе описывается настолько сложной системой кинетических уравнений, что ее решение обычными численными методами крайне затруднительно, особенно если учитывать сложную геометрию задачи и многокомпонентный состав вещества. Трудности возникают уже на стадии задания многопараметрической исходной информации о свойствах ядерных реакций, которые в области высоких энергий характеризуются рождением большого числа вторичных частиц. В этих условиях наиболее адекватным способом теоретического рассмотрения является применение метода Монте-Карло на всех стадиях расчета - как при моделировании распространения потока частиц в веществе, так и при задании исходной информации путем расчета внутриядерных каскадов. При этом удается не только учесть разнообразие особенности взаимодействий частиц и ядер с ядрами, но и моделировать специфику конкретной обстановки: расположение и эффективность приборов, временные вариации и т.д., т.е. полностью смоделировать ситуацию на ЭВМ.

В ОИЯИ разработан метод статистического моделирования различных ядерно-физических процессов, сопровождающих прохождение пучка частиц через вещество. Реализованный на ЭВМ CDC-6500 и БЭСМ-6 комплекс программ позволяет моделировать взаимодействия адронов и ядер с гетерогенными конденсированными и газообразными средами практически любой конфигурации, включающими до шести различных химических компонентов /в том числе и водород-содержащие компоненты/. Небольшое изменение программ позволяет рассматривать и более сложный химический состав, с энергией первичных частиц от долей эВ до 10 ГэВ/нуклон. Энергетический спектр и состав первичных частиц может зависеть от пространственных координат. Если это - поток космических частиц, то

учитывается его изменение магнитным полем планеты. Специальная программа позволяет рассматривать распространение гамма-квантов.

Вычисляются спектральные характеристики и пространственные распределения частиц различных типов внутри и вне облучаемого вещества, пространственное распределение различных типов ядерных реакций, их продуктов и тепловыделения. Выдаются соответствующие интегральные величины: число образовавшихся частиц определенного типа, полный выход изотопов, суммарное тепловыделение и т.п.

В программу заложены коэффициенты биологической эффективности мезонов и нуклонов, соответствующие одностороннему и однородному облучению биологического объекта, благодаря чему программа может вычислять пространственные распределения и интегралы доз облучения.

В основу моделирования ядерных взаимодействий положен механизм внутриядерных каскадов с учетом конкуренции процессов испарения и деления возбужденных остаточных /послекаскадных/ ядер. Учитываются предравновесные процессы распада таких ядер, а также изменение плотности числа внутриядерных нуклонов в ходе развития каскада из-за выбивания части нуклонов. При расчете внутриядерных каскадов исходная информация задается в виде таблиц, описывающих элементарные адрон-адронные взаимодействия /подробнее см. об этом в монографии <sup>/1/</sup> и статьях <sup>/2/</sup>.

Расчет ядерных взаимодействий /"узлов" разветвленного каскадного "дерева" в веществе/ - наиболее сложная и трудоемкая часть задачи. Она оформлена в виде двух моделей - отдельно расчет внутриядерного каскада и расчет распада /испарения и деления/ остаточного ядра. Дополнительный модуль позволяет включить в расчет распад ядер в предравновесной стадии, когда ядро после вылета из него быстрых каскадных частиц постепенно релаксирует к равновесному состоянию <sup>/3/</sup>.

Программы расчета взаимодействия частицы / $\pi$ -мезона, протона, нейтрона/ с ядром и расчета взаимодействия двух ядер могут использоваться для решения физических задач независимо от расчета межъядерного каскада.

Со стороны высоких энергий /10 ГэВ/нуклон или  $\pi$ -мезон/ использованный нами механизм внутриядерных каскадов ограничен главным образом необходимостью учета кварковых эффектов при рассмотрении элементарных взаимодействий внутри ядра /в частности, так называемого времени формирования частиц после их взаимодействия/. Такие модели еще только создаются <sup>/4/</sup>.

Каскадно-испарительная модель ядерных реакций применима при энергиях выше ~10 МэВ. Поскольку при меньших энергиях основной вклад дают взаимодействия нейтронов /большинство  $\pi$ -мезонов уже успевает распасться, а медленные протоны останавливаются из-за ионизационных потерь, не испытав ядерного взаимодействия/. Для описания низкоэнергетических ядерных реакций мы воспользовались 26-групповой системой феноменологических констант <sup>/5/</sup>, широко применяемой в настоящее время в реакторной технике.

Используемая в наших программах библиотека констант содержит данные для 50 ядер. В каждом конкретном случае с помощью системного редактора БЭСМ-6 или редактирующей программы UPDATE на CDC-6500 необходимые данные заносятся в соответствующие массивы и используются далее как входные данные задачи<sup>/6/</sup>.

Библиотека может быть расширена. В частности, могут быть включены данные для усредненного описания сложных химических соединений, что в ряде случаев позволяет существенно упростить вычисления без заметной потери точности.

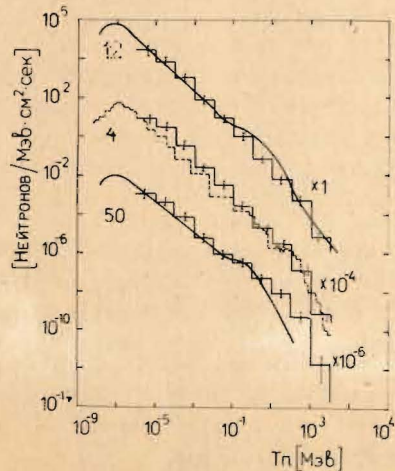
Пробег частицы до ядерного взаимодействия в неоднородной среде, параметры которой /сечение взаимодействия/ зависят от энергии рассматриваемой частицы, находятся путем численного решения интегрального уравнения. Эта часть расчета похожа на соответствующую часть расчета внутриядерного каскада, где вероятность взаимодействия также зависит от локальной плотности числа нуклонов и энергии каскадной частицы /см.<sup>11/</sup>/. Существенное различие состоит лишь в непрерывном уменьшении энергии частицы в среде из-за потерь энергии на ионизацию и возбуждение атомов среды.

При вычислениях учитываются распады  $\pi$ -мезонов и уменьшение их времени жизни вследствие релятивистских эффектов. Низкоэнергетические ветви каскадного дерева рассчитываются в подгрупповом приближении<sup>/7/</sup>, что позволяет рассматривать небольшие /по сравнению с пробегом нейтронов/ и гетерогенные /в частности, слоистые/ мишени. При расчете каскадов в атмосфере учитывается барометрическое изменение плотности воздуха с высотой.

Среднее время, необходимое для расчета с 5%-ной точностью усредненных по мишени энергетических спектров нейтронов и протонов, пространственного распределения тепловыделения и выхода основных изотопов составляет 0,5-1 ч. Время вычислений значи-

тельно возрастает, если интересоваться локальными спектрами частиц, распределениями изотопов с малым выходом или какими-либо редкими ядерными реакциями.

В качестве примера возможностей и точности нашей программы на рисунке приведены спектры нейтронов, генерированных космическим излучением в атмосфере на высотах 4, 12 и 50 км над уровнем моря /географическая широта местности 42°/. Гистограммы - наш расчет; показаны статистические погрешности расчета. Кривые - экспериментальные данные, пунктир - расчет американских авторов<sup>/8/</sup>.



При моделировании экспериментов, в которых регистрируются отдельные ядерные взаимодействия /"звезды"/ в среде - например, опытов с фотоэмульсией или пузырьковыми камерами, - удобно с помощью наших программ рассчитать и записать на магнитную ленту необходимое число звезд, а дальнейшую их обработку выполнять с помощью тех же программ, что и соответствующие экспериментальные "звезды".

На практике встречаются задачи, когда источник вторичных частиц, связанный со сложной геометрией /например, ловушка частиц сложной конфигурации на пучке ускорителя/ окружен толстым слоем однородного вещества. В этих случаях с помощью прямого /аналогового/ метода Монте-Карло очень трудно набрать достаточную статистику. Комплекс программ организован так, что на основе известных методов<sup>/9/</sup> можно легко ввести соответствующие весовые функции, существенно улучшающие статистическую достоверность результатов. Возможен и другой подход к решению этой задачи: вычислить поток и спектры частиц на поверхности простой геометрической формы в начале слоя однородного вещества и использовать эти данные в качестве граничных условий для последующего решения задачи с помощью кинетических уравнений.

Следует подчеркнуть, что наши программы ориентированы в основном на физиков, которым чаще приходится решать однократные задачи с существенным изменением начальных условий /например, при изменении условий, касающихся механизмов ядерных реакций, или при моделировании нового эксперимента/, нежели выполнять многократные повторные расчеты при близких условиях, как это часто приходится делать инженеру. В применении к "массовым" инжекторным расчетам программы без значительного снижения их точности могут быть существенно упрощены за счет более огрубленного описания взаимодействий частиц и ядер, введения "среднего ядра", использования весовых функций и т.п. Таким образом, удается получить большой выигрыш во времени счета.

В настоящее время наши программы используются в Ереванском физическом институте, Московском инженерно-физическом институте, Обнинском филиале Московского инженерно-физического института.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Взаимодействия высокоэнергетических частиц и ядер с ядрами. Атомиздат, М., 1972.
2. Барашенков В.С. и др. УФН, 1973, т. 109, с. 91; ЯФ, 1984, т. 39, с. 1133.
3. Машник С.Г., Тонеев В.Д. ОИЯИ, Р4-8417, Дубна, 1974.
4. Амелин Н.С. и др. ОИЯИ, Р2-84-369, Дубна, 1984.
5. Абагян Л.П. и др. Групповые константы для расчета реакторов и защиты. Атомиздат, М., 1981.
6. Соснин А.И. и др. ОИЯИ, Б2-11-82-31, Дубна, 1982.

7. Хохлов В.Ф. и др. В кн.: "Ядерные константы", М., 1972, вып.8, ч. 3, с. 3.
8. Armstrong T.W. et al. J.Geophys.Res., 1973, vol.73, p. 2715.
9. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. "Наука", М., 1982.

Барашенков В.С. и др. P2-85-173  
Программный комплекс "Каскад" для монте-карловского моделирования ядерно-физических процессов, инициируемых высокоэнергетическими частицами и ядрами в газообразных и конденсированных средах

Создан программный комплекс "Каскад" для моделирования методом Монте-Карло ядерно-физических процессов в средах под действием высокоэнергетических частиц и ядер. В основу моделирования ядерных взаимодействий положен механизм внутри-ядерных каскадов с учетом испарения и деления возбужденных остаточных ядер. Созданные программы позволяют вычислять спектральные характеристики и пространственные распределения ядерных реакций различных типов, их продуктов, тепловыделения и соответствующие интегральные характеристики. Программный комплекс реализован на ЭВМ CDC-6500 и БЭСМ-6.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Barashenkov V.S. et al. P2-85-173  
"CASCADE" Program Complex for Monte-Carlo Simulation of Nuclear Processes Initiated by High Energy Particles and Nuclei in Gaseous and Condensed Matter

Program complex "Cascade" for Monte-Carlo simulation of nuclear processes initiated in different gaseous and solid targets under the high energy particles and nuclei irradiation has been created. Simulation of nuclear interactions is based on the intranuclear cascade mechanism taking into account evaporation and fission of residual excited nuclei. The created computer programs allow the calculation of spectral characteristics and space distributions of various nuclear reactions, their products, energy, dissipated in the matter, and corresponding integral characteristics. The program complex is functioning on the CDC-6500 and BESM-6 computers.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.  
Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985

Рукопись поступила в издательский отдел  
6 марта 1985 года.