

Б-245



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА

4659 / 2-81

14/9-81

P2-81-364 +.

В.С.Барашенков

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
МЕЖЪЯДЕРНЫХ КАСКАДОВ,  
ИНИЦИИРУЕМЫХ ЧАСТИЦАМИ  
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Направлено на III Всесоюзную научную  
конференцию по защите от ионизирующих  
излучений ядерно-технических установок  
/Тбилиси, ИПМ ТГУ, октябрь 1981 г./

1981

Необходимость статистического моделирования процессов, реализующихся при прохождении пучков высокоэнергетических частиц сквозь вещество /конденсированное или газообразное/, возникает как при решении "чисто физических" проблем, связанных, например, с восстановлением характеристик ядерных взаимодействий по данным об атмосферных ливнях, так и во многих задачах, касающихся оценки радиационной обстановки вокруг ускорителей, и в других аналогичных случаях. Особенностью всех таких задач является большая множественность и очень широкий энергетический спектр частиц, рождающихся в ядерных столкновениях внутри вещества. При взаимодействии с тяжелым ядром это часто десятки мезонов и нуклонов с энергиями от нескольких МэВ и до значений, близких к энергии первичной частицы. В эту множественность дают вклад существенно различные по своей природе ядерные процессы: внутриядерный каскад; неравновесное испускание частиц на стадии релаксации сильно возбужденного "последокаскадного" ядра; испарение и деление остаточного ядра, охлаждение этого ядра и осколков деления путем  $\gamma$ -излучения.

В целом распространение пучка высокоэнергетических частиц в веществе оказывается настолько сложным явлением, что описать его аналитически, с помощью каких-то уравнений, крайне затруднительно, особенно если учитывать сложную геометрию задачи и многокомпонентный состав вещества. Трудности возникают уже на стадии задания многофакторной исходной информации для описания свойств ядерных реакций. В этих условиях наиболее адекватным способом теоретического анализа представляется статистическое моделирование явления на основе метода Монте-Карло. При этом удается не только учесть разнообразные детали ядерных взаимодействий, но и моделировать специфические особенности конкретных экспериментов\*.

Метод статистического моделирования различных процессов, связанных с распространением высокоэнергетических частиц и ядер в конденсированных и газообразных средах, в течение ряда лет

---

\* Вместе с тем было бы неправильным противопоставлять подходы на основе кинетических уравнений и метода Монте-Карло. У этих способов расчета разные области применимости. В ряде случаев использование кинетических уравнений оказывается весьма эффективным /см., например, /1/ /.

разрабатывается в ЛТФ и ЛВТА ОИЯИ. Задействованные на ЭВМ CDC-6500 и БЭСМ-6 программы позволяют анализировать взаимодействие адронов и легких ядер с гетерогенным веществом практически произвольной геометрии и состава в интервале энергий от долей эВ /пучки индуцированных тепловых нейтронов/ и до нескольких десятков ГэВ. Рассчитываются интенсивность и спектры частиц различных типов внутри и вне облучаемого вещества, пространственное распределение и параметры продуктов ядерных реакций, распределение тепловыделения.

Процесс взаимодействия высокоэнергетической частицы /или ядра/ с веществом рассматривается как развитие быстро нарастающего каскада вторичных частиц, теряющих свою энергию на ионизацию и возбуждение атомов среды и взаимодействующих с ядрами в "узлах" каскадного "дерева". Некоторые вторичные частицы могут при этом распадаться. Это, как правило, происходит с  $\pi^0$ -мезонами, а в протяженных средах и с  $\pi^\pm$ -мезонами. С ростом энергии частиц вероятность их распадов уменьшается согласно релятивистским законам.

Расчет "узлов" каскадного дерева - наиболее сложная и трудоемкая часть задачи. В принципе для описания этих "узлов" можно воспользоваться феноменологическими аппроксимациями известных экспериментальных данных. Для решения некоторых ограниченных задач - например, когда интересуются усредненными характеристиками излучения простого химического состава - такой подход может быть весьма эффективным, хотя подготовка феноменологических аппроксимаций для широкого интервала энергий сама по себе очень трудная задача, оправданная лишь в случае многократного повторения расчетов для вещества данного состава.

Ориентируясь на разнообразные задачи, мы с самого начала отказались от такого подхода, выполняя вместо этого в каждом "узле" расчет упругого или неупругого ядерного взаимодействия. Исключение составляет лишь область энергий, меньших 10,5 МэВ, где все вычисления межъядерного каскада выполняются на основе известной 26-групповой системы констант Л.П.Абагян и др.<sup>/2/</sup>.

В настоящее время известно много моделей ядерных взаимодействий при высоких энергиях, по форме и деталям часто весьма значительно отличающихся одна от другой. Однако в их основе, как правило, лежит один из двух механизмов внутриядерных взаимодействий: каскадный механизм, когда взаимодействие рассматривается как разветвленная последовательность некогерентных взаимодействий быстрых частиц с отдельными внутриядерными нуклонами, и коллективный механизм, при котором взаимодействие быстрой частицы происходит когерентно сразу с несколькими внутриядерными нуклонами. Эти два типа взаимодействий, конечно, не являются абсолютно изолированными и могут переходить один в другой по мере того, как когерентное взаимодействие, реализую-

щееся в отдельных узлах каскадного дерева, постепенно захватывает все это дерево /или наоборот, когда единое коллективное взаимодействие распадается на отдельные обособленные блоки/. В наших программах используется механизм внутриядерных каскадов, дополненный рассмотрением конкурирующих между собой процессов испарения и деления возбужденного "послекаскадного" ядра. Сравнение с опытом показывает, что этот механизм работает вплоть до энергий 10-20 ГэВ. При больших энергиях теоретический каскад оказывается слишком мощным и множественность рождающихся частиц /особенно низкоэнергетических нуклонов, представляющих собой, в основном, нуклоны отдачи из отдельных внутриядерных столкновений/ в 1,5-2 раза больше, чем это наблюдается на опыте. В настоящее время этим определяется верхняя энергетическая граница применимости разработанной нами модели.

В общих чертах расчет внутриядерного каскада - в частности, определение длины свободных пробегов частиц - близко к расчету каскада в веществе: существенное отличие состоит лишь в дополнительном учете ионизационных потерь энергии и распадов каскадных частиц в межъядерном каскаде. При энергиях, больших нескольких ГэВ, следует принимать во внимание обеднение ядра нуклонами в результате выбивания последних лавиной быстрых каскадных частиц, пренебрежение этим эффектом приводит к значительному завышению множественности рождающихся частиц.

При моделировании внутриядерного каскада информация о мезон-нуклонных и нуклон-нуклонных взаимодействиях задается феноменологически в виде аналитических и табличных распределений, по которым производится розыгрыш характеристик рождающихся частиц. По сравнению со случаем адрон-ядерных взаимодействий информация о столкновениях элементарных частиц не столь многофакторна /меньшее число различных типов "узлов" каскадного дерева/, и ее можно компактно и в то же время достаточно точно аппроксимировать аналитическими выражениями с табличными коэффициентами, подобранными по соответствующим экспериментальным данным. В нашем распоряжении имеются достаточно точные аппроксимации адрон-адронных взаимодействий, применимые вплоть до нескольких тысяч ГэВ<sup>/3,4/</sup>.

В каждом акте взаимодействия, особенно при небольшом числе рождающихся частиц, необходимо учитывать закон сохранения энергии-импульса - замыкание многоугольника четырехмерных импульсов вторичных частиц в системе их центра масс. В настоящее время такое замыкание делается "силовым образом": для двух вторичных частиц характеристики не разыгрываются, а фиксируются исходя из закона сохранения<sup>/3/</sup>. Это несколько искажает распределение, аппроксимирующие экспериментальные данные, однако более удовлетворительного способа розыгрыша характеристик, на которые наложены связи, нам не известно.

Правда, на расчетных распределениях частиц в веществе это сказывается слабо.

Специальные подпрограммы позволяют учитывать температурные поправки и резонансную самоэкранировку сечений в низкоэнергетической области или использовать константы в подгрупповом приближении, что очень существенно при расчетах распределений потоков нейтронов с малыми энергиями в гетерогенных средах.

Поскольку эти подпрограммы содержат большой объем исходной численной информации, то при расчете каскадов в многокомпонентных средах могут возникнуть трудности с памятью ЭВМ. Для этих случаев предусмотрено сегментирование программы, когда вся подготовка констант выполняется заранее /за время меньше 1 мин/, после чего происходит автоматическая загрузка скорректированными константами основной программы.

Формально наши программы не содержат каких-либо органичений на массовое число налетающего ядра, и в принципе их можно использовать не только для легких, но и для тяжелых ядер. Однако в последнем случае верхняя граница применимости рассматриваемого нами каскадного механизма внутриядерных взаимодействий значительно меньше, чем в случае адрон-ядерных столкновений /<1 ГэВ/нуклон налетающего ядра/. Если не считать дейтронов и  $\alpha$ -частиц, то достаточно детального и систематического исследования каскадного механизма в случае взаимодействия двух ядер пока не выполнено.

Точность рассчитанных по нашим программам величин, как правило, оказывается в пределах точности экспериментальных данных. Исключение составляет область энергии налетающих частиц порядка нескольких десятков МэВ, где наш метод расчета внутриядерных каскадов недостаточно точен /3/. Теоретические и экспериментальные данные согласуются здесь с точностью до фактора +1,5-2/.

Что касается времени расчета, то для таких величин, как интегральные спектры частиц внутри защиты, спектры частиц за защитой с толщиной в десятки см, распределение тепловыделения, это время составляет около 30-60 мин. Время вычислений существенно возрастает при переходе к очень толстым слоям вещества, в этом случае целесообразно использовать комбинированный способ расчета, когда результаты статистического моделирования выдаются на некоторую простую поверхность и рассматриваются далее как источники в соответствующем кинетическом уравнении.

Время расчета каскадов в атмосфере с 5%-ной точностью в интегральных спектрах частиц - порядка одного-двух часов.

\* Точность метода можно улучшить путем учета предравновесной эмиссии частиц из "послекаскадного" ядра /5/. Однако расчеты при этом становятся более сложными.

Следует отметить, что аналогичный метод расчета межъядерных каскадов разработан в Окриджской лаборатории /США/. Оба метода дают близкие результаты. Заметные расхождения отмечались лишь для низкоэнергетической компоненты нейтронного потока в очень тяжелых средах. Благодаря уточнению обоих методов, в настоящее время эти расхождения при  $T \leq 1$  ГэВ практически устранены /6,7/.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Казарновский М.В. и др. Препринт ИЯИ-АН СССР П-0149, М., 1980.
2. Абагян Л.П. и др. Групповые константы. Атомиздат, М., 1964.
3. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Взаимодействие высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. Атомиздат, М., 1972.
4. Барашенков В.С., Славин Н.В. ОИЯИ, P2-80-533, P2-80-694, P2-80-700, Дубна, 1980.
5. Гудима К.К. и др. ОИЯИ, P2-80-774, P2-80-777, Дубна, 1980.
6. Барашенков В.С., Шамаков С.Ю. АЭ, 1981, т.50, с.150.
7. Alsmiller F.S. et al. ORNL/TM-7528, Oak Ridge, 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 мая 1981 года.