

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

P2-87-789

**В.С.Барашенков, Б.Ф.Костенко**

**МОДЕЛЬ ВНУТРИЯДЕРНОГО КАСКАДА  
С УЧЕТОМ ВРЕМЕННОЙ КООРДИНАТЫ  
И МНОГОЧАСТИЧНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ**

**1987**

## Введение

В области энергий, меньших нескольких ГэВ, каскадный механизм ядерных реакций является в настоящее время рабочим инструментом для многих имеющих важное прикладное значение задач <sup>/1,2/</sup>. При более высоких энергиях модель внутриядерных каскадов используется для описания ядерных реакций с участием частиц-резонансов и для описания реакций с учетом кварковой структуры андронов <sup>/3,4/</sup>. В настоящей работе обсуждаются алгоритмы, выходящие за рамки описанных в публикациях <sup>/5-7/</sup> и учитывающие не только пространственные, но и временную координаты. Особое внимание уделено учету "перепутывания" каскадных траекторий взаимодействиями, в которых принимают участие сразу несколько каскадных частиц. Общепринятые алгоритмы каскадных расчетов в этом случае неприменимы. Обсуждаемые ниже пространственно-временные алгоритмы с многочастичными взаимодействиями могут быть применены и к расчету кваркового каскада при высоких энергиях, когда плотность "кварковой лавины" в ядре весьма велика.

Несмотря на более детальное моделирование внутриядерных траекторий, новые алгоритмы требуют лишь небольшой дополнительной затраты времени ЭВМ.

## Учет временной координаты

В моделях, не учитывающих изменения свойств ядра-мишени под действием лавины каскадных частиц и не рассматривающих многочастичные взаимодействия, отдельные ветви каскада можно считать независимыми. Это предположение используется в большинстве каскадных расчетов при  $E \lesssim 1$  ГэВ. Временная координата в расчет не входит.

В работе <sup>/6/</sup>, где было впервые принято во внимание изменение плотности ядра в ходе процесса, временная динамика учитывалась путем первоочередного прослеживания взаимодействий наиболее быстрых частиц. В общих чертах алгоритм расчета сводился к пяти основным этапам, (см. рис.1): (1) - рассчитываются координаты и импульсы всех нуклонов ядра-мишени; (2) - из всей совокупности каскадных частиц со скоростями  $v_1 = p_1 / \sqrt{p_1^2 + m^2}$  выбирается частица с  $\max v_1$ ; (3) - разыгрывается точка ее взаимодействия; (4) - рассчитываются характеристики рождающихся в этом взаимодействии частиц; (5) - проверяется, удовлет-

воряют ли они принципу Паули; если да, то ядерный нуклон-мишень переводится в разряд каскадных частиц, если нет, то продолжается прослеживание траектории ранее выбранной частицы. Расчет заканчивается после исчерпания всех каскадных частиц (вылета или поглощения медленных в ядре), после чего стандартными методами (см., например, /5,8/) рассчитывается распад остаточного ядра.

Недостаток этой и других подобных моделей состоит в том, что иногда пришедшая со стороны медленная частица успевает выбить ядерный нуклон раньше, чем с ним провзаимодействует быстрая /9/. Это происходит, когда

$$t_1 + \lambda_1/V_1 < t_2 + \lambda_2/V_2, \quad V_1 < V_2,$$

где  $t_1, \lambda_1, V_1$  - время взаимодействия, длина свободного пробега и скорость медленной частицы,  $t_2, \lambda_2, V_2$  - соответствующие величины для быстрой частицы.

В работе бруксгейвенской группы /10/ предложена каскадная модель, учитывающая временную динамику путем рассмотрения всех происходящих в ядре событий через очень короткие последовательные интервалы времени  $\Delta t$ . Однако такой подход требует очень большого времени ЭВМ.

Расчетное время можно существенно сократить, если положения каскадных частиц контролировать лишь в моменты их взаимодействий с нуклонами ядра /11/ (модель допускает обобщение и на случай взаимодействий каскадных частиц друг с другом). В принципиальном отношении алгоритм расчета сводится к семи основным блокам (см. рис. 2). Блоки 1, 3, 4, 5 имеют тот же смысл, что и для рис. 1. В блоке 2 теперь производится выбор частицы с наименьшим временем взаимодействия. Блок 6 формирует цикл по всем имеющимся каскадным частицам. Наконец, в блоке 7 выполняется смещение всех каскадных частиц в положения, соответствующие времени последнего разыгранного взаимодействия, с которого производится дальнейший отсчет времени.

Можно еще более оптимизировать алгоритм расчета, если уменьшение числа ядерных нуклонов (эффект трейлинга) учитывать путем выравнивания сечений (см., например, метод Колмена в книге /12/). В этом случае расчет пробегов и точек взаимодействия частиц выполняется с использованием начального распределения ядерных нуклонов, без учета того, что некоторые из них на самом деле будут выбиты за время движения каскадных частиц до точек их взаимодействия. Изменение ядерной плотности учитывается путем простой браковки: перед розыгрышем взаимодействия каждый раз проверяется, присутствует ядерный нуклон в данной точке или он уже выбит другой каскадной частицей. Такой способ расчета избавляет от перерозыгрыша пробегов и точек взаимо-

действия каскадных частиц после расчета каждого внутриядерного взаимодействия. Вычисляются пробеги лишь вновь рождающихся частиц (в том числе ядерных нуклонов, переведенных в разряд каскадных).

#### Каскадная модель с многочастичными взаимодействиями

Необходимость учета в каскаде многочастичных взаимодействий, когда с внутриядерным нуклоном взаимодействуют сразу несколько каскадных частиц, отмечалась еще в работе /13/, где эти взаимодействия исследовались с помощью очень грубой модели - без учета трейлинга и с весьма приближенной временной упорядоченностью событий.

Основная трудность при моделировании многочастичных взаимодействий состоит в почти полном отсутствии сведений об их свойствах. С другой стороны, именно это обстоятельство стимулирует интерес к их изучению путем сравнения с опытом каскадных моделей, основанных на тех или иных гипотезах.

Алгоритм розыгрыша ветвей внутриядерного каскада, связанных многочастичными взаимодействиями, должен удовлетворять требованию причинности: события из будущего не должны влиять на события в прошлом. При этом следует учитывать не равную нулю пространственно-временную протяженность каждого акта многочастичного взаимодействия. Это определяет и основную идею расчета: в многочастичное взаимодействие объединяются все частицы с пробегами, оканчивающимися в такой ограниченной пространственно-временной области. Ее пространственные размеры можно считать близкими к размерам нуклона; объединением в одно взаимодействие сразу нескольких ядерных нуклонов можно пренебречь (за исключением процессов поглощения  $\pi$ -мезона на паре нуклонов; см. ниже).

В целях наглядности будем изображать состояния системы диаграммой, где абсциссы - номера внутриядерных нуклонов, а ординаты - моменты начала взаимодействий каскадных частиц с этими нуклонами. Например, на некотором этапе вычислений состояние системы может описываться диаграммой рис. 3, где каждой каскадной частице соответствует определенная точка.

Пусть частице с минимальным временем взаимодействия  $t_{\min}$  соответствует нуклон-партнер с номером  $i$ . Тогда совокупность всех событий, которые без нарушения причинности можно объединить в единое взаимодействие с этим нуклоном, лежит в полосе  $[t_{\min}, t_{\min} + \tau]$ , где  $\tau$  - длительность многочастичного взаимодействия. Для всех каскадных частиц, попавших в эту полосу, будем последовательно, шаг за шагом, от меньших времен к большим, проверять: 1) не был ли выбит уже ранее данный ядерный нуклон и 2) если нет, то разрешено ли взаимодействие с ним по принципу Паули. В случае невыполнения одного из этих условий траектории соответствующих каскадных частиц продолжают до следующих точек взаимодействия (см. рис. 4).

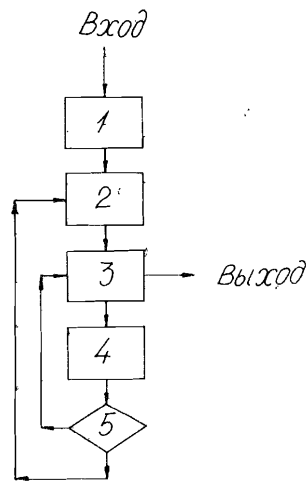


Рис. 1

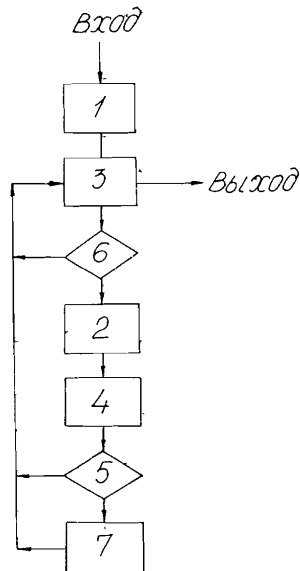


Рис. 2

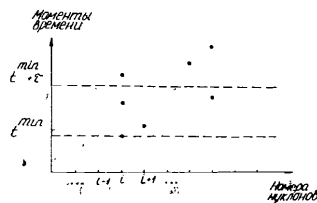


Рис. 3

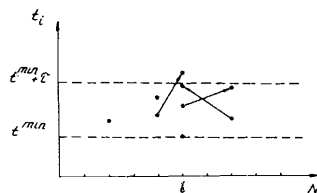


Рис. 4

После завершения указанной процедуры будут известны все частицы, одновременно (в интервале  $\Delta t = \tau$ ) взаимодействующие с  $i$ -м нуклоном, и, следовательно, могут быть разыграны характеристики взаимодействия — одно- или многочастичного в зависимости от числа каскадных частиц. Всем родившимся и упруго рассеянным частицам присваивается одно и то же время  $t_i = t_{\min} + \tau$ , после чего для них вычисляются пробеги и времена взаимодействий.

Описанная процедура повторяется в цикле до исчерпания всех каскадных частиц в ядре, после чего выполняется стандартный расчет предравновесной и делительно-испарительной стадий [5, 14].

Следует заметить, что приведенные рассуждения основаны на неявном допущении факторизации сечения многочастичных процессов, когда вероятность взаимодействия группы каскадных частиц считается пропорциональной произведению вероятностей взаимодействий отдельных частиц. При этом теряются уменьшающие сечение эффекты взаимозащиты каскадных частиц. Однако их можно учесть, снова воспользовавшись методом выравнивания сечений, если выполнять дополнительную браковку выявленных актов многочастичных взаимодействий с вероятностью  $(\prod_{i=1}^n \sigma_i - \sigma_M) / \prod_{i=1}^n \sigma_i$ , где  $\sigma_M$  — сечение многочастичного взаимодействия с участием  $n$  каскадных частиц,  $\sigma_i$  — сечения их взаимодействий с ядерным нуклоном.

#### Поглощение $\pi$ -мезонов парой нуклонов

Поглощение медленного  $\pi$ -мезона в ядре можно рассмотреть в модели с образованием резонанса [15] или на основе феноменологического эквивалента этой модели — поглощения на паре ядерных нуклонов. Первый подход сводится просто к появлению в ядре новой каскадной частицы с соответствующими сечением взаимодействия и вероятностью распада. Второй способ более часто используется в каскадных расчетах. Его тоже нетрудно включить в схему с многочастичными взаимодействиями. Действительно, пусть мезон поглощается парой нуклонов, один из которых имеет номер  $i$  (нуклон-партнер, попавший в цилиндр взаимодействия каскадной частицы и взаимодействующий с ней с сечением  $\frac{\sigma_{abs}}{A}$ , где  $\sigma_{abs}$  — сечение поглощения  $\pi$ -мезона на ядре,  $A$  — атомный номер ядра). Тогда дальнейшее моделирование можно осуществить по следующей схеме:

1) при выполнении цикла операций "1,2" описанной ранее общей схемы (см. рис. 2) проверяется, обладает ли рассматриваемый мезон наименьшим временем в группе частиц, взаимодействующих с тем же  $i$ -м нуклоном. Если нет, то поглощение не разыгрывается и

2) траектория мезона прослеживается дальше (поскольку нуклон будет выбит раньше, чем произойдет поглощение  $\pi$ -мезона). Если же условие "1" выполнено, то

3) время, приписываемое мезону, увеличивается на  $\tau$  (тем самым учитывается дополнительная задержка реакций поглощения на паре) и продолжается выполнение операций "1,2" основной схемы. Если при этом рассматриваемый мезон встречается повторно, то

4) разыгрывается его поглощение на двух системах —  $i$ -м нуклоне со всеми попавшими в него в промежутке времени  $(t_{\min}, t_{\min} + \tau)$  частицами и аналогичной системе, образовавшейся на некотором соседнем нуклоне\*. Это завершает разыгрыш поглощения  $\pi$ -мезона.

\* Термин "соседний нуклон" понимается в том же смысле, как и в общепринятой каскадной модели без многочастичных взаимодействий (см., например, [5-8]).

Общая схема расчета внутриядерного каскада

Подробное описание программы моделирования каскада приведено в депонированной публикации /16/. На рис. 5 изображены его основные этапы. Чтобы не затенять рис. деталями, в нем опущены ветви, ответственные за расчет самоэкранировки сечений и поглощение пионов нуклонными парами. В техническом отношении их подключение не вызывает затруднений (например, пионная абсорбция подключается в точках 2, 3, 7).

Расчет складывается из следующих этапов:

- PINPN - определение точки входа частицы в ядро;
- POINT - подпрограмма розыгрыша точки взаимодействия каскадной частицы внутри ядра;
- TYPINT - моделирование взаимодействия каскадной частицы с внутриядерным нуклоном;
- PRINC - проверка принципа Паули;
- I7 - вычисление характеристик вылетевшей из ядра частицы;
- 20 - вычисление характеристик остаточного ядра.

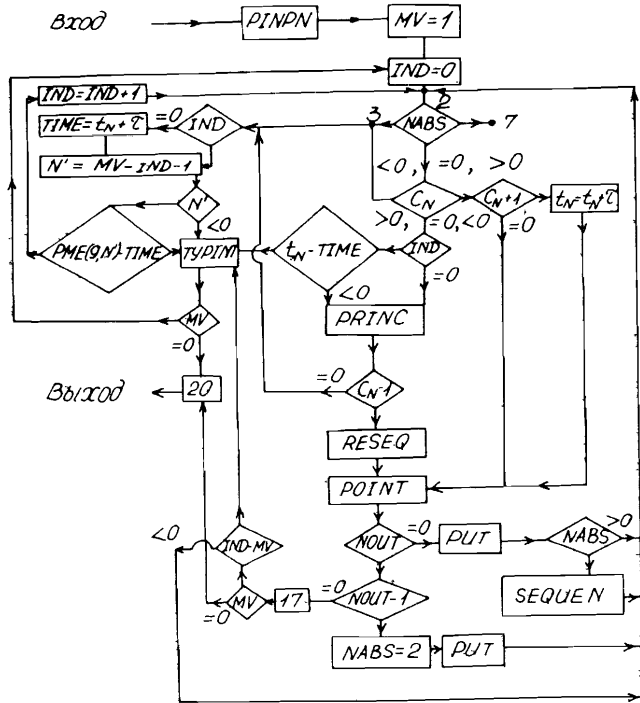


Рис. 5

Подпрограммы PUT, SEQUEN, RESEQ осуществляют манипуляции с массивами информации о текущем состоянии системы. При этом характеристики каскадных частиц и внутриядерных нуклонов содержатся в массивах PМЕ, IМЕ и PИМЕ, IИМЕ соответственно, а все операции (упорядочение частиц в соответствии с их временами взаимодействия, учет выбивания нуклонов из ядра и др.) выполняются с адресами (номера) частиц в этих массивах. С этой целью введены следующие основные массивы:

MT - массив номеров каскадных частиц, упорядоченный в соответствии с их временами взаимодействия;

MAN - массив номеров присутствующих в ядре нуклонов; в ячейках массива IМЕ (9+I3, I), отвечающих каскадной частице с номером I, записаны (оператором ENCODE) номера внутриядерных нуклонов, лежащих в цилиндре взаимодействия рассматриваемой каскадной частицы, упорядоченные вдоль ее траектории движения. Последовательность

$$I_1, I_2 = IМЕ(5, I_1), I_3 = IМЕ(5, I_2), \dots$$

упорядочена в соответствии с временами  $t_i = PМЕ(9, I_i)$  взаимодействия частиц и содержит все частицы, попавшие в тот же нуклон, что и рассматриваемая частица  $I_1$  позже нее.

Подпрограмма PUT помещает номер рассматриваемой каскадной частицы в нужное место массива MT;

SEQUEN вычисляет последовательность номеров частиц, попавших в тот же нуклон, что и рассматриваемая;

RESEQ изменяет, если нужно, эту последовательность.

Другие использованные в блок-схеме обозначения:

MV - число каскадных частиц;

IND - индекс каскадной частицы в цикле (вычисление точек взаимодействия для группы частиц, которые могут быть связаны причинно-следственной связью с первым по времени взаимодействием);

$t_N$  - время взаимодействия для частицы с номером N;

TIME - время окончания взаимодействия;

NABS - "признак поглощения" (для  $\pi$ -мезонов) на паре:

- = 0 - поглощение не происходит,
- = 1 - поглощение происходит, продолжительность абсорбции еще не учтена,
- = 2 - происходит поглощение на поверхности ядра, продолжительность абсорбции еще не учтена,
- = 3 - получается из I после учета времени абсорбции,

$$t \rightarrow t + \tau_{abs}$$

= 4 получается из 2 после учета времени абсорбции,

$$t \rightarrow t + \tau_{\text{abs}},$$

= -I-разыграны характеристики нуклонов пары после поглощения  $X$ -мезона;

$C_N$  - "признак состояния" каскадной частицы:

$C_N$  = -2-частица рассматривается в момент ее образования,

$C_N$  = -I-взаимодействие частицы с нуклоном не происходит, траекторию необходимо проследить дальше,

$C_N$  = 0-еще не произведена проверка того, что смоделированное взаимодействие удовлетворяет принципу Паули,

$C_N$  = I-необходимо произвести розыгрыш взаимодействия каскадной частицы с внутриядерным нуклоном,

$C_N$  = 2-частица захвачена ядром;

$N_{OUT}$  - "признак выхода" частицы из ядра:

$N_{OUT}$  = I-в цилиндре взаимодействия каскадной частицы нет нуклонов,

$N_{OUT}$  = 0-в противном случае.

Символом  $\triangle$  на блок-схеме обозначена операция проверки знака величины  $A$ .

#### Литература

1. Барашенков В.С. ОИЯИ, P2-85-26, Дубна, 1985.
2. Барашенков В.С. и др. ОИЯИ, P2-85-173, Дубна, 1985.
3. Амелин Н.С., Барашенков В.С. ОИЯИ, P2-83-770, Дубна, 1983.
4. Амелин Н.С. ОИЯИ, P2-86-802, P2-86-837, Дубна, 1986. •
5. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Взаимодействие высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. Атомиздат, М., 1972.
6. Барашенков В.С. и др. УФН, 1973, т. 109, с. 91.
7. Амелин Н.С., Барашенков В.С. ОИЯИ, Б1,2-12958, Дубна, 1979.
8. Gudima K.K., Toneev V.D. Proc. of V Intern. Sump. on. Inter. of Fast Neutron with Nuclei. Gaussing 1976.
9. Барашенков В.С., Костенко Б.Ф. ОИЯИ, Д1,2-12036, Дубна, 1978, с. 410.
10. Chen K. et al. Phys. Rev., 1969, v.166, s. 949.
11. Barashenkov V.S. et al. Nucl. Phys., 1980, v. A338, p.413.
12. Михайлов Г.А. Некоторые вопросы теории методов Монте-Карло. Новосибирск, Наука, 1974.
13. Artukov I.S. et al. Nucl. Phys., 1968, v. 136, p.II.
14. Машник С.Г., Тонеев В.Д. ОИЯИ, P4-8417, Дубна, 1974.
15. Амелин Н.С. и др. ОИЯИ, P2-83-768, Дубна, 1983.
16. Костенко Б.Ф. ОИЯИ, Б1,2-87-790, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел  
3 ноября 1987 года.

Барашенков В.С., Костенко Б.Ф.

P2-87-789

Модель внутриядерного каскада с учетом временной координаты и многочастичных взаимодействий

Обсуждается блок-схема и основные этапы расчета адронного внутриядерного каскада, инициируемого высокоэнергетическим нуклоном или мезоном. Рассмотрен вклад многочастичных взаимодействий, когда с одним ядерным нуклоном взаимодействуют сразу несколько каскадных частиц. Расчет выполняется с явным учетом как пространственных, так и временной координат.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Barashenkov V.S., Kostenko B.F.

P2-87-789

Intranuclear Cascade Model Taking into Account Time Coordinate and Many-Particle Interactions

The flowchart and principal stages of calculating the hadron intranuclear cascade initiated by high energy nucleon or meson is discussed. Contribution of many-particle interactions when one nucleon interacts with several cascade particles simultaneously is considered. Calculation is performed taking into account both spatial and time coordinates in explicit form.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987