

Использование метода дискретных ординат в задачах расчета мишеней, бланкетов и радиационной защиты электроядерных систем

В.П. Крючков, О.В. Суманеев

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

А.М. Волощенко

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, Москва, Россия

Введение

Прогресс в создании протонных ускорителей промежуточных энергий с высокой интенсивностью пучка стимулирует возрастающий интерес к созданию электроядерных систем (accelerator-driven systems (ADS)). Традиционно для моделирования этих систем используется метод Монте-Карло.

Использование метода дискретных ординат (МДО) для расчета высокоэнергетического переноса протон-пион-нейтрон-фотонного каскада предоставляет дополнительную возможность для расчета радиационных полей в мишенях, бланкетах и радиационной защите ADS систем, которая позволяет существенно уменьшить (по сравнению с программами, использующими метод Монте-Карло) процессорное время и требования к памяти ЭВМ при расчете энергетических и пространственно-угловых распределений источника “spallation” нейтронов, а также в задачах глубокого проникновения излучения, типичных для расчетов радиационной защиты мишеней. Кроме того, МДО дает полную информацию о пространственно-угловых и спектральных распределениях радиационных полей в расчетной композиции.

1. Организация многогруппового расчета каскада в рамках МДО

С вычислительной точки зрения, основные проблемы, возникающие при использовании МДО и многогруппового приближения при расчете переноса адронного каскада связаны со следующими обстоятельствами: а) необходимостью учета переноса нескольких (до ~ 15) типов частиц каскада; б) высокой степенью анизотропии рассеяния (для предотвращения появления отрицательных потоков сечения рассеяния должны быть подготовлены в достаточно высоком P_L приближении, обычно используется P_{11} приближение); в) необходимостью явного учета члена непрерывного замедления для заряженных компонент излучения в задачах с узким пучком первичного излучения, что делает невозможным использование для этих целей стандартных S_n программ [1].

При использовании МДО решение задачи разбивается на два этапа. На *первом* этапе для заданного набора материалов производится подготовка многогрупповых сечений в виде объединенного файла констант, содержащего сечения для высокоэнергетической части задачи (область адронного каскада, энергии $E > 20$ МэВ), сечений перехода в низкоэнергетическую часть задачи с $E < 20$ МэВ (оба указанных типа сечений могут быть подготовлены посредством константной системы САДКО-2 [2]), а также сечений для области энергий $E < 20$ МэВ, для подготовки которых может быть использована стандартная многогрупповая система констант для переноса нейтронов и фотонов (например, CONSYST/ABBN-93). Следует подчеркнуть, что в задачах переноса заряженного излучения выбор группового разбиения определяется источником, а энергетическая сетка одновременно используется и для аппроксимации члена непрерывного замедления. Поэтому использование фиксированного группового разбиения (как это делается в стандартных многогрупповых библиотеках для нейтронов и фотонов для энергий $E < 20$ МэВ) в области адронного каскада неэффективно.

На *втором* этапе для решения системы многогрупповых уравнений в заданной геометрии для каждого типа излучения, присутствующего в задаче, используется соответствующая S_n программа: в 1D геометриях нами используется программа РОЗ-6.5 [3], а в 2D геометриях — программа КАСКАД-С [4]. Обе эти программы позволяют явно учитывать член непрерывного замедления для заряженных компонент излучения со вторым порядком точности.

Наличие нескольких типов излучения приводит к существенному увеличению полного числа групп в задаче, и соответственно, к росту вычислительных затрат. Пусть, например, в задаче учитываются три типа излучения: протоны, пионы и нейтроны с одинаковым энергетическим разбиением и числом групп Q . При использовании стандартного (по типам излучения) расположения групп в объединенном файле сечений:

$$1_p, 2_p, \dots, Q_p, 1_\pi, 2_\pi, \dots, Q_\pi, 1_n, 2_n, \dots, Q_n \quad (1)$$

имеет место полная матрица переходов, включая переходы вверх по группам, размером $3Q \times 3Q$, что с учетом необходимости использования высокого P_L приближения приводит к существенным вычислительным затратам при проведении внешних итераций.

В области адронного каскада все переходы связаны с замедлением частиц. Воспользовавшись этим обстоятельством, можно перейти к расположению групп “по энергии”:

$$1_p, 1_\pi, 1_n, 2_p, 2_\pi, 2_n, \dots, Q_p, Q_\pi, Q_n. \quad (2)$$

В этом случае структура матрицы переходов имеет блочно-диагональный вид с числом блоков, равным числу групп каждого типа излучения Q . Переходы вверх по группам из q -го блока, состоящего из групп q_p, q_π, q_n , не выходят за пределы блока. Это позволяет проводить внешние итерации не по всей матрице переходов, а поблочно. При этом источник для групп блока, соответствующий переходам из групп, принадлежащих верхним блокам, может быть рассчитан только один раз и при проведении внешних итераций внутри блока (число которых обычно не велико — 4–6 при точности сходимости 10^{-3}) может считываться из памяти. Как показал численный эксперимент, такая реорганизация многогруппового расчета и итерационных циклов приводит к многократному уменьшению времени расчета каскадной части задачи.

В задачах с делением дополнительный выигрыш во времени может быть получен за счет записи “spallation” источника (отличного от нуля только в верхних группах низкоэнергетической части расчета) и считывания его из памяти при проведении итераций по источнику деления.

Обе указанные возможности реализованы в программах РОЗ-6.5 и КАСКАД-С. В программе КАСКАД-С реализована также запись/ввод источника “spallation” нейтронов, оформленного в виде файла анизотропного источника определенного формата, что позволяет использовать его и в других программах.

Для записи многогруппового файла сечений используется формат FMAC-M, который требует существенно меньшей памяти для хранения информации о сечениях (особенно в задачах с большим числом групп и высокой степенью анизотропии сечений), чем формат ANISN. Кроме того, он содержит всю необходимую информацию для расчета каскада.

2. Расчет переноса пучка заряженного излучения

Если пучок излучения и мишень имеют осевую симметрию, то для описания переноса заряженных компонент излучения (протоны и пионы) можно воспользоваться уравнением переноса в 2D r, z геометрии в приближении непрерывного замедления, которое имеет вид

$$-r \frac{\partial}{\partial E}(\beta\psi) + \mu r \frac{\partial \psi}{\partial z} + \xi \frac{\partial}{\partial r}(r\psi) - \frac{\partial}{\partial \varphi}(\eta\psi) + \sigma r \psi(r, z, \mu, \varphi, E) = rS(r, z, \mu, \varphi, E), \quad (3)$$

где $\beta = \beta(r, z, E)$ — ограниченная тормозная способность (для нейтральных частиц $\beta = 0$); $\xi = (1 - \mu^2)^{1/2} \cos \varphi$, $\eta = (1 - \mu^2)^{1/2} \sin \varphi$ и $\mu = \cos \theta$ направляющие косинусы единичного вектора

скорости частицы $\vec{\Omega}$, $\vec{\Omega} = (\xi, \eta, \mu)$, $-1 \leq \xi, \mu \leq 1$, $0 \leq \eta \leq 1$, $0 \leq \varphi \leq \pi$, $S(r, z, \mu, \varphi, E)$ — правая часть уравнения переноса, включающая интеграл рассеяния и другие источники в зависимости от задачи.

Для аппроксимации уравнения (3) по каждой из переменных используется адаптивная WDD (AWDD) схема 2-го порядка точности, а для ускорения внутренних итераций — согласованная P₁SA схема ускорения внутренних итераций. Для повышения точности расчета нерассеянная компонента излучения от мононаправленного источника заряженного излучения с заданным радиальным распределением, падающего перпендикулярно на торец мишени, рассчитывается по аналитическим формулам. Более подробно этот численный алгоритм, реализованный в программе КАСКАД-С, описан в [1].

В табл. 1 приведены результаты расчета выхода нейтронов из свинцовой мишени диаметром 20 см и длиной 60 см, облучаемой пучком протонов различной энергии с гауссовским радиальным распределением $f_{mono}(r) = I_0 \exp(-r^2/(2\sigma^2))/(2\pi\sigma^2)$, где $\sigma = 1.6$ см, I_0 — интенсивность пучка, полученные с использованием пакета КАСКАД-С/САДКО-2.

В этой же таблице приведены экспериментальные данные [6] и результаты расчета задачи методом Монте-Карло посредством программы ЛАНЕТ (последние данные взяты из работы [5]). Данные в таблице нормированы на 1 протон пучка. Число групп протонов, пионов и нейтронов в области энергий $E > 14.5$ МэВ варьировалось от 23 до 31 в зависимости от энергии протонов пучка. Ниже 14.5 МэВ использовались 28 групповых нейтронных сечений из библиотеки БНАБ-78. Таким образом, полное число групп в расчете варьировалось от 97 до 121. В области адронного каскада использовалось $S_{14}P_{11}$, а ниже 14.5 МэВ — $S_{12}P_5$ приближение. Пространственная сетка состояла из 19×68 пространственных интервалов.

Таблица 1: Выход нейтронов из цилиндрической свинцовой мишени диаметром 20 см и длиной 60 см, облучаемой пучком протонов.

Энергия протонов (МэВ)	Экспериментальные данные	ЛАНЕТ, модель Бертини	ЛАНЕТ, модель “pre-equilibrium”	КАСКАД-С/САДКО-2, AWDD схема
1000	21.5	23.10	21.01	21.58
1500	32.5	34.97	32.50	33.21
2000	42.0	45.15	41.98	44.34
2650	53.5	57.17	53.61	56.41
3250	64.5	67.76	64.07	64.16
5000	89.8			88.66

На рис. 1 представлены пространственные распределения полного потока протонов и нейтронов в рассматриваемой мишени для энергии протонов пучка 1000 МэВ, нормированные на один протон источника.

Заключение

Использование МДО для расчета ADS систем при наличии качественных групповых данных по сечениям в области адронного каскада представляется весьма эффективным. Как показал опыт расчетов, основная вычислительная проблема, возникающая в задачах с узкими пучками протонов, — это лучевые эффекты. Для их предотвращения при расчете адронного каскада приходится использовать квадратуры достаточно высокого порядка, а также сгущать узлы квадратуры в направлении $\mu = 1$.

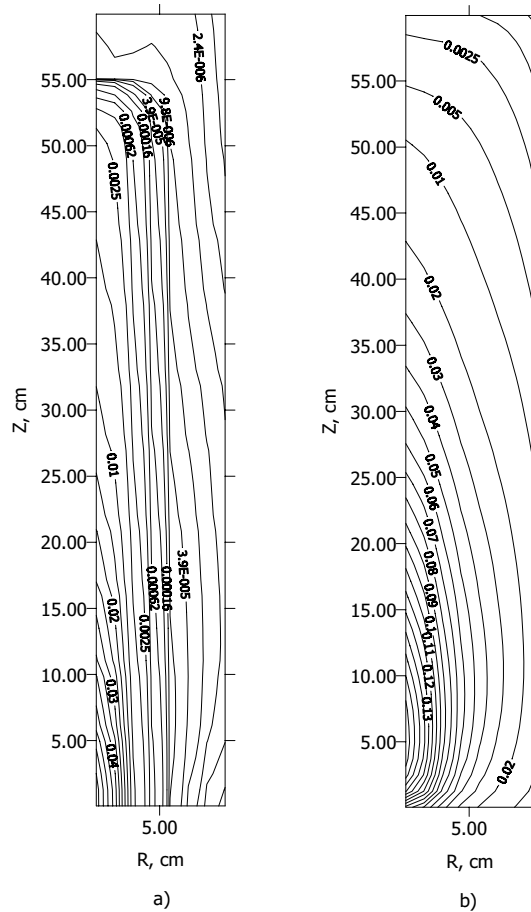


Рис. 1: Пространственное распределение потока протонов (а) и нейтронов (б) в мишени.

Литература

- [1] Voloschenko A.M. An S_n Algorithm for Spallation Target Neutronics and Shielding Calculations. – Proceed. of International Conference on Mathematics and Computations, Reactor Physics, and Environmental Analysis in Nuclear Applications, 27-30 September, 1999, Madrid, Spain, vol. 2, p. 975.
- [2] Gorbatkov D.V. and Kryuchkov V.P. SADCO-2: a Modular Code System for Generating Coupled Nuclear Data Libraries to Provide High-Energy Particle Transport Calculations by Multigroup Methods, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A, 372, 297 (1996).
- [3] Волощенко А.М., Дубинин А.А. РОЗ-6.5 — программа для решения уравнения переноса нейтронов, фотонов и заряженного излучения методом дискретных ординат в одномерных геометриях, Отчет ИПМ РАН, инв. N 7-6-98 (1998).
- [4] Волощенко А.М., Швецов А.В. КАСКАД-С-1.5 — программа для решения уравнения переноса нейтронов, фотонов и заряженного излучения методом дискретных ординат в двумерных геометриях, Отчет ИПМ РАН, инв. N 7-8-98 (1998).
- [5] Landeyro P.A., Guidotti M., Silvani V., Neuhold P. Simulation of Thick Target Experiments for the Validation of Spallation Codes. – Proceed. Intern. Conf. on the Phys. of Nucl. Sci. and Techn., October 5-8, 1998, Long Island, NY, USA, vol. 2, p. 1327.
- [6] Vassil'kov R.G., Yurevich V.I. Neutron Emission from an Extended Lead Target Under the Action of Light Ions in the GeV Region, ICANS-XI International Collaboration on Advanced Neutron Sources, KEK, Tsukuba, October 22-26, 1990, p. 340.