

Методы описания неупругих $h(\gamma)A$ -взаимодействий в комплексе программ RTS&T

И.И. Дегтярев, И.А. Язынин

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

А.И. Блохин

ГНЦ РФ Физико-энергетический институт, Обнинск, Россия

Приводится обзор моделей ядерных взаимодействий и феноменологических систематик дважды-дифференциальных сечений неупругих hA -, γA -реакций в областях промежуточных и низких энергий, реализованных в программном комплексе RTS&T [1]. Проводится детальное сравнение распределений вторичных частиц, полученных на основе используемых систематик или модельных представлений, с многочисленными экспериментальными данными, содержащимися в базе данных EXFOR [19] и в оригинальных публикациях.

Обзор моделей неупругих ядерных взаимодействий комплекса RTS&T. Моделирование актов неупругого ядерного взаимодействия адрона (фотона) основывается на использовании различных методов описания событий: компиляций оцененных ядерных данных, феноменологических и полуфеноменологических параметризаций характеристик событий, теоретических моделей взаимодействий или их комбинаций, что обеспечивает оптимальное соотношение точности генерации характеристик вторичных частиц и временных затрат в контексте конкретной прикладной задачи. В переносных схемах реперного класса точности идеальным (в контексте точности описания) является непосредственное использование файлов оцененных ядерных данных, предоставляющих всю полноту информации об интегральных и дифференциальных характеристиках акта взаимодействия.

Для реакций, вызываемых нейтронами низких (до 20 МэВ) энергий, созданы и широко используются современные версии национальных библиотек оцененных ядерных данных (ENDF/B-VI [3], JENDL 3.2 [4], BROND 2.2 [6], CENDL 2.0 [7]), представленные в унифицированном формате ENDF. В последнее время для обеспечения возрастающих потребностей в ядерных данных, протекающих под действием частиц промежуточных энергий и фотонов в диапазонах энергий гигантского дипольного резонанса и квазидейтронного эффекта, разработан ряд расширенных (по типам и энергетическому диапазону первичных частиц) библиотек (табл. 1).

Таблица 1: Состав некоторых расширенных библиотек оцененных ядерных данных.

| Библиотека | Первичная частица | Диапазон энергий, МэВ | Число изотопов |
|------------------|-------------------|-----------------------|----------------|
| LA150 [2] | p, n | ≤ 150 | 34 |
| | γ | ≤ 140 | |
| BOFOD [8] | γ | ≤ 40 | > 63 |
| JENDL-PHOTO [11] | γ | ≤ 140 | 50 |

На настоящий момент как минимум три программных комплекса (BRAND [14], RTS&T, GEANT4) реализуют метод беспроцессингового использования файлов оцененных нейтронных данных, реализованных в ENDF-формате. Методологически достаточно близки к ним и широко используемые программы MCNP и MCNPX [9], переведенные в специализированный формат с единой энергетической шкалой. Два из перечисленных выше комплекса программ MCNPX и RTS&T предусматривают использование расширенных библиотек ядерных данных (последний — по беспроцессинговой схеме). В области энергий адронов $E_{inc} > 150$ МэВ, где эксплуатация файлов оцененных ядерных данных носит экспериментальный характер и их число

крайне ограничено, в комплексе RTS&T реализованы два альтернативных (и взаимно дополняющих друг друга) подхода, первый из которых предполагает непосредственное использование каскадно-экситонной модели ядерных реакций, как, по-видимому, наиболее универсальной (в отношении диапазонов энергий первичных частиц, классов описываемых реакций и типов выходных характеристик) в области промежуточных энергий, синтезирующей описание каскадной стадии ядерного взаимодействия в рамках квазиклассической модели внутриядерных каскадов, стадий предравновесной и равновесной эмиссии в конкуренции с каналом бинарного деления - на основе экситонной и испарительной моделей соответственно с использованием рекомендованных компиляций параметров ядерных моделей RIPL [18].

Существенными недостатками непосредственного использования эксклюзивного адронного генератора, основанного на каскадно-экситонной модели, в программах моделирования переноса излучения являются: наличие определенного произвола в выборе свободных параметров, линейное увеличение временных затрат с ростом энергии первичной частицы, высокая погрешность описания характеристик продуктов реакций на легких ядрах с $A < 16$ (существенная в дозиметрических приложениях) и эмиссии фрагментов. Кроме того, для реализации ряда локальных оценок потока при статистическом моделировании переноса излучения желательна аналитическая форма представления одно- и дваждыдифференциальных сечений рождения частиц.

К настоящему времени разработан ряд феноменологических и полуфеноменологических систематик дваждыдифференциальных сечений рождения адронов в неупругих hA -взаимодействиях в области промежуточных энергий [15]-[17]. Одна из наиболее детальных систематик (формализм D2N2) разработана Б.С. Сычевым и аккумулирует данные оригинальных публикаций, доступных на конец 70-х годов, и расчетов на основе двухстадийной каскадно-испарительной модели ядерных реакций. С целью повышения точности систематики D2N2, ее обобщения на класс фотоядерных реакций в диапазоне энергий $E_{inc} \leq 1.2$ ГэВ и учета ранее игнорировавшихся каналов (например, инициированного адронами и фотонами промежуточных энергий процесса бинарного деления тяжелых изотопов, образования частиц в резонансных каналах $NN \rightarrow NN\pi$ и каналах перезарядки, кумулятивного рождения) была произведена модификация систематики на основе всей полноты информации EXFOR, известных авторам оригинальных публикаций, оценок библиотеки LA150 и расчетов в рамках каскадно-экситонной модели для энергий первичных частиц $E_{inc} \geq 100$ МэВ и формализма модели GNASH [12] в диапазоне энергий ниже данного порога. Переход к формализму GNASH обусловлен нижним ограничением применимости квазиклассического приближения модели внутриядерных каскадов (вытекающего из условия непревышения длины дебройлевской волны участвующих во взаимодействии частиц среднего расстояния между внутриядерными нуклонами ≈ 1 фм). Программа GNASH была предварительно модифицирована с учетом RIPL-рекомендованных систематик входных параметров модели. Расчет парциальных коэффициентов проницаемости производился по оптической модели, реализованной в программе SCAT3 [13]. Дваждыдифференциальные спектры эмиссии частиц и фотонов в послекаскадных процессах представлены суперпозицией парциальных спектров предравновесной, равновесной стадий развала ядра и канала бинарного деления. Угловые распределения частиц предравновесной эмиссии описываются на основе систематики [20].

Следует отметить, что экспериментальных данных, доступных на текущий момент времени, для проведения надежной оценки явно недостаточно. Кроме того, различия в имеющемся экспериментальном материале, предоставленном различными коллективами авторов, зачастую существенно выше приводимых ошибок измерений. Использование модельных расчетов позволило исключить из всей совокупности данных явно ошибочные и произвести оценку сечений для изотопов и энергетических диапазонов, по которым нет экспериментальной информации. Сечения вычислялись с использованием рекомендованных наборов входных параметров моде-

лей. В случае расхождения расчетных сечений с экспериментальными данными производилась корректировка параметров модели для достижения наилучшего согласия с эмпирическим набором. Табулированные значения коэффициентов параметризации оформлялись в виде специализированной библиотеки. Модифицированная систематика, занимая промежуточное положение между аналитическими аппроксимациями с параметрами, представленными плавными функциями, и строгой оценкой данных с соблюдением законов ENDF-формата, может быть использована как непосредственно в программах расчета переноса излучения с непрерывной энергетической шкалой, так и в качестве исходной информации при подготовке библиотек групповых констант.

На рис. 1–4 приведены результаты сопоставления дифференциальных и интегральных характеристик неупругих pA -взаимодействий, рассчитанных в рамках различных описательных подходов, с экспериментальными данными. На рис. 5–6 показаны результаты численного моделирования интегрального выхода нейтронов и продольного распределения энерговыделения для цилиндрических мишеней ($d = 20$ см, $L = 60$ см), облучаемых узким пучком протонов ($E_p = 1$ ГэВ),

Список литературы

- [1] A.I. Blokhin, I.I. Degtyarev et al. Proceed. of the SARE-3 Workshop, KEK, 1997.
- [2] M.B. Chadwick et al. LANL Report NM 87545.
- [3] R.F. Ross (Ed.). BNL-NCS-17541.
- [4] K. Shibata et al. JAERI-1319, 1990.
- [5] S. Ganesan, ed., INDC(NDS)-297, IAEA, Vienna, 1994.
- [6] A.I. Blokhin et al. Nuclear Data for Science and Technology, v. 2, p. 695 (American Nuclear Society, LaGrange, IL, 1994).
- [7] CENDL-2, Report IAEA-NDC-61, Rev. 3, 1996.
- [8] А.И. Блохин и др. ВАЯТ, Сер. Ядерные константы, 1999, вып. 2, с. 95.
- [9] H.G. Hughes et al. Proceed. of the SARE-3 Workshop, KEK, 1997.
- [10] C. Nordborg, M. Salvatores. Nuclear Data for Science and Technology, 1994.
- [11] T. Fukahori. In: Proceed. of the SATIF-3 Meeting, Tohoku Univ. Sendai, Japan, 1997.
- [12] P.G. Young et al. LA-12343-MS.
- [13] O. Bersillon. CEA-N-2227, NEANDC(E) 220'L', INDC(FR) 49/L, 1981.
- [14] А.А. Андросенко, П.А. Андросенко. ВАЯТ, Сер. Физ. и тех. яд. реакт., 1985, Вып. 7, с. 41.
- [15] B.S. Sychev. Cross Sections of Interaction of High Energy Hadrons with Atomic Nuclei, Radiotechnical Institute of Russian Academy of Sciences, 1999.
- [16] S. Pearlstein. Nuc. Sci. Eng. 95, 116, 1987.
- [17] K. Ishibashi et al. in Nuclear Data for Science and Technology, Julich, 13-17 May 1991, p. 742.
- [18] Reference Input Parameter Library (RIPL). IAEA-TECDOC-Draft, March 1998.
- [19] <http://www-nds.iaea.org/exfor/>.
- [20] C. Kalbach. Phys. Rev. C37, 6, 1988.

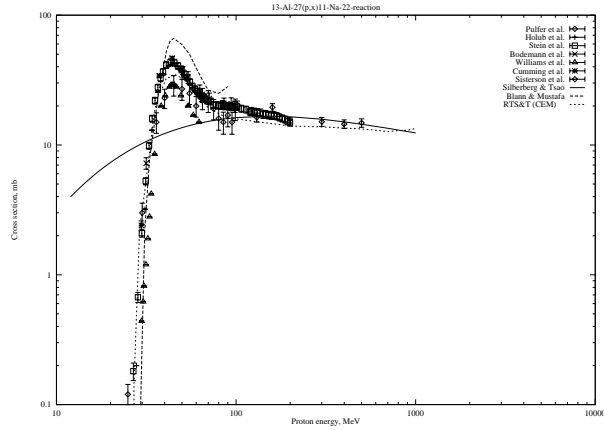


Рис. 1: Экспериментальные и расчетные сечения $Al^{27}(p, x)Na^{22}$ -реакции.

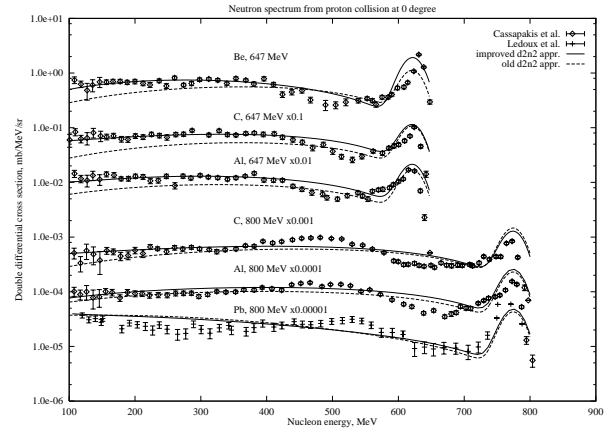


Рис. 4: Дваждыдифференциальные сечения образования нейтронов в прямой стадии реакции.

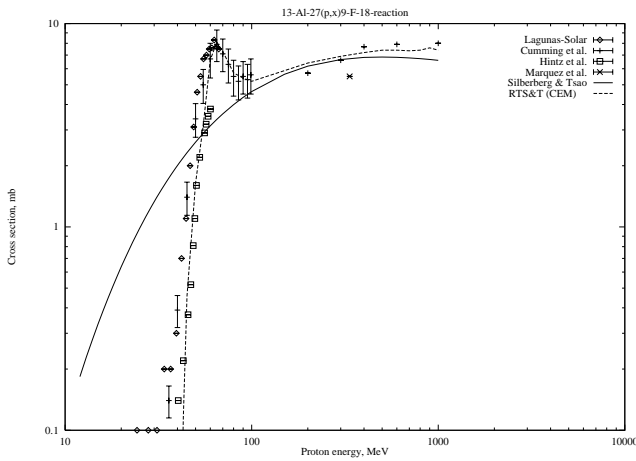


Рис. 2: Экспериментальные и расчетные сечения $Al^{27}(p, x)F^{18}$ -реакции.

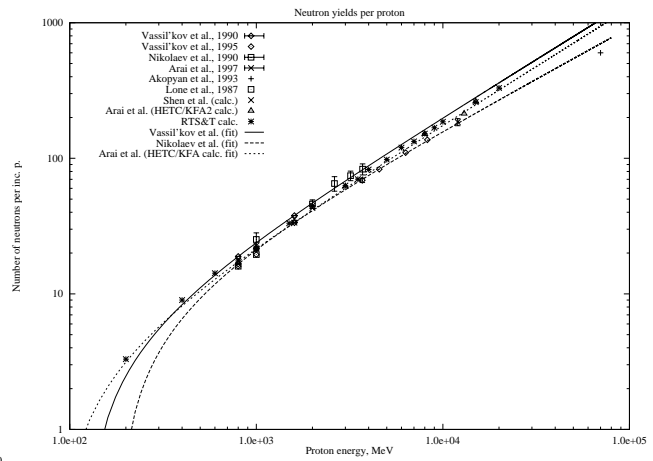


Рис. 5: Интегральный выход нейтронов из цилиндрической свинцовой мишени.

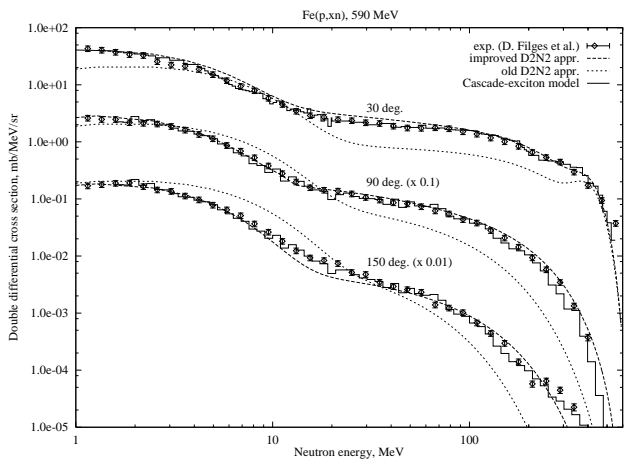


Рис. 3: Дваждыдифференциальные спектры нейтронов $Fe^{56}(p, xn)$ -реакции при $E_{inc} = 590$ МэВ.

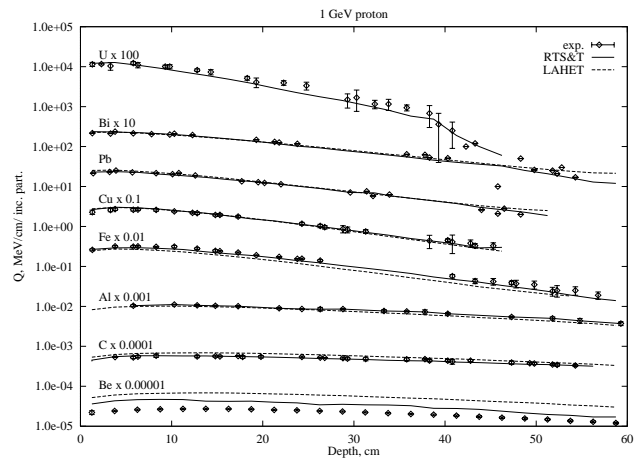


Рис. 6: Распределение энергвыделения протонов в цилиндрических мишенях различного материального состава.