

УДК 539.17

МЕЖДУНАРОДНАЯ СЕТЬ ЦЕНТРОВ ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ БЕЛАРУСИ

А. А. ПАНКОВ, А. В. ЦИТРИНОВ, И. А. ПАНКОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,*

Республика Беларусь

*Филиал Международного центра теоретической физики
имени А. Салама*

Введение

Среди огромного разнообразия ядерных реакций немаловажное место занимают реакции, вызванные электромагнитными взаимодействиями. Такие реакции протекают за счет электромагнитного поля, свойства которого хорошо изучены, и механизм передачи энергии от налетающего γ -кванта исследуемому ядру известен точно. В таких реакциях проще, чем в реакциях под действием нейтронов и заряженных частиц, отделить эффекты структуры ядра от механизмов его возбуждения [1], [2]. В качестве примера можно привести реакцию, соответствующую каналу распада гигантского дипольного резонанса (ГДР) с образованием нуклона или их комбинаций $((\gamma, n), (\gamma, p), (\gamma, np), (\gamma, 2n), (\gamma, 3n)$ и т. п.). Сумма всех парциальных реакций описывает все возможные (за исключением рассеяния) каналы выбывания фотонов из первичного пучка – реакцию полного фотопоглощения:

$$(\gamma, abs) = (\gamma, 1n) + (\gamma, np) + (\gamma, 2n) + (\gamma, 3n) + \dots + (\gamma, 1p) + (\gamma, 2p) + \dots + (\gamma, f), \quad (1)$$

где (γ, f) – реакция деления, которая возможна лишь в относительно тяжелых ядрах.

В силу различных обстоятельств, которые будут рассмотрены далее, во многих случаях данные по реакциям (γ, n) и $(\gamma, 2n)$ оказываются взаимосвязанными и влияющими друг на друга. Такие данные, полученные в разных экспериментах, существенно расходятся друг с другом [3], [4]. Большинство данных по реакциям (γ, n) и $(\gamma, 2n)$ получено в экспериментах с квазимоноэнергетическими аннигиляционными фотонами в Лоуренсовской Ливерморской национальной лаборатории (National Lawrence Livermore Laboratory) США и Центре ядерных исследований Франции (France Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay) в Саклэ. Причиной их существенных расхождений между собой являются определенные недостатки использованных в экспериментах процедур определения множественности фотонейтронов.

Выполненные исследования [3]–[6] показали, что во многих случаях данные по сечениям полной фотонейтронной реакции

$$(\gamma, xn) = (\gamma, 1n) + (\gamma, np) + 2(\gamma, 2n) + 3(\gamma, 3n) + \dots + v(\gamma, f), \quad (2)$$

непосредственно получаемые в экспериментах с различными пучками налетающих фотонов, также заметно отличаются друг от друга. Были изучены основные причины таких расхождений и предложены способы согласования данных друг с другом. Изучение фотоядерных реакций связано с целым рядом специфических трудностей:

– отсутствие интенсивных пучков моноэнергетических фотонов;

- относительно малые абсолютные величины сечений фотоядерных реакций;
- относительная близость энергетических порогов различных парциальных реакций в области энергий ГДР.

Необходимость создания в конкретных экспериментах условий, в которых эти трудности могли бы быть преодолены, приводит к определенным систематическим различиям их результатов. Они зависят от метода получения данных и по величине во многих случаях существенно превосходят достигаемые статистические погрешности. Важной задачей является оценка систематических погрешностей и разработка методов комбинированного анализа различных экспериментов. Такая задача требует для своего решения одновременного доступа к результатам различных экспериментов.

Эта задача не может быть эффективно решена без свободного доступа к базам экспериментальных данных. В последнее время такие базы данных, содержащие практически всю информацию как о сечениях реакций, так и о способах их определения и методах получения данных, были созданы в Международном агентстве по атомной энергии (МАГАТЭ) [7], Национальном центре ядерных данных США [8] и Центре данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ [9]. Эти базы данных являются основой для детального и системного анализа накопленной информации. В представленном обзоре дано описание методов извлечения информации о ядрах и ядерных реакциях через банки ядерных данных.

Международные базы данных по ядерным реакциям

Большинство данных о сечениях фотоядерных реакций (как полных, так и парциальных) получено в экспериментах двух основных типов, использующих пучки тормозного γ -излучения (ТИ) и квазимоноэнергетических аннигиляционных (КМА) фотонов. Условия получения информации о сечении реакции в экспериментах этих двух типов заметно различаются, поскольку существенно различаются аппаратные функции. Различия эффективных спектров фотонов в ТИ и КМА экспериментах по существу ставят вопрос о том, что именно в них интерпретируется как сечение реакции.

Сечения одной и той же реакции, полученные в экспериментах разных типов, имеют существенные расхождения, превосходящие достигнутые статистические погрешности. Для надежного исследования ГДР и различных каналов его необходимо обеспечить высокую точность определения сечений реакции полного фотопоглощения и парциальных фотоядерных реакций, таких как (γ, n) , (γ, p) , (γ, np) , $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$. К основным проблемам экспериментального исследования фотоядерных реакций относятся: отсутствие интенсивных пучков моноэнергетических фотонов, малые величины сечений реакций, относительно близкие значения энергетических порогов различных реакций, высокие уровни фона, малые эффективности детекторов и др.

Эффективное проведение совместного анализа данных, полученных в различных экспериментах, возможно при наличии компьютерных методов обработки, хранения и анализа накопленной информации по ядерным данным (ЯД). Такие методы стали доступны исследователям после создания международных баз данных по ядерным реакциям.

Международное научное сообщество образовало под эгидой Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) сотрудничество Центров ядерных данных по подготовке данных по ядерным реакциям под действием нейтронов для решения задач атомной и ядерной энергетики, которое первоначально образовали 4 головных организации – Секция ядерных данных МАГАТЭ, Национальный центр ядерных данных (Брукхэвенская Национальная лаборатория) США, Банк данных Агентства по атомной энергии Франции и Центр ядерных данных (Физико-энергетический институт, Обнинск, Россия). Впоследствии к ним присоединилось еще несколько Цен-

тров и групп ядерных данных из Венгрии, Китая, Кореи, России, Украины, Японии, а в круг интересов были включены данные по ядерным реакциям под действием заряженных частиц и тяжелых ионов.

Основной задачей участников сети является создание полных (репрезентативных) баз данных (БД), содержащих описание характеристик ядерных реакций и свойств атомных ядер. Такие БД должны обеспечивать их эффективное использование для решения широкого класса фундаментальных и прикладных проблем.

Деятельность указанных Центров включает в себя:

- поиск данных по всем доступным БД и их компиляцию;
- разработку единого формата данных;
- проведение экспертизы точности и надежности ЯД;
- согласование результатов различных экспериментов;
- создание системы доступа к данным (банки и базы данных, Интернет-интерфейсы);
- анализ и оценка ЯД;
- подготовка, издание и распространение аналитических обзоров, указателей, атласов по ЯД и т. д.

Рис. 1. Главная страница Web-сайта Центра данных фотоядерных экспериментов НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына при МГУ им. М. В. Ломоносова

На Web-сайте Центра данных фотоядерных экспериментов (ЦДФЭ) НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова (рис. 1) (<http://cdfe.sinp.msu.ru>) пользователям предоставляются 11 БД [2], [10]–[16]:

- «База данных по ядерным реакциям» (<http://cdfe.sinp.msu.ru/exfor/index.php>) включает в себя характеристики ядерных реакций под действием различных налетающих частиц (выходы, сечения, функции возбуждения реакций, энергетические, угловые, зарядовые, массовые и другие распределения частиц–продуктов реакций, поляризации, анализирующие способности, корреляции и др.);

- «База ядерно-спектроскопических данных» (<http://cdfe.sinp.msu.ru/services/ensdfr.html>) содержит информацию об энергетических уровнях известных в настоящее время атомных ядер (~ 3500) и переходах между ними (энергии, спины, четности, времена

жизни, мультипольности, коэффициенты ветвления и смешивания, вероятности переходов, значения параметров распадов, данные об изоспинах ядерных состояний, квадрупольных моментах и деформациях ядер и др.);

- БД «Параметры основных состояний ядер» (<http://cdfе.sinp.msu.ru/services/gsp.en.html>) содержит данные по атомным ядрам в целом (распространенности стабильных изотопов и времени жизни нестабильных изотопов, атомные массы, дефекты масс, энергии связи, спины, четности, изоспины основных состояний ядер, энергии первых изобар-аналогов и др.);

- БД «Публикации по ядерной физике» (http://cdfе.sinp.msu.ru/services/nsr/Search_form.shtml) предоставляет справочно-библиографическую информацию по ядерно-физическим работам из международного банка данных NSR (NuclearScienceReferences);

- БД «Параметры гигантского дипольного резонанса, сечения фотоядерных реакций» (<http://cdfе.sinp.msu.ru/services/gdrsearch.html>) включает в себя данные по характеристикам ГДР, наблюдаемым в сечениях ядерных реакций под действием γ -квантов (энергия максимума, амплитуда в максимуме, ширина резонанса, интегральные сечения, моменты и др.);

- БД «Индекс фотоядерных данных с 1955 г.» (<http://cdfе.sinp.msu.ru/services/rnisearch.html>) содержит коллекцию справочно-библиографической информации об экспериментальных работах, посвященных исследованию электромагнитных взаимодействий ядер;

- «Карта параметров формы и размеров ядер» (<http://cdfе.sinp.msu.ru/services/nsr/defchart/defmain.html>) содержит данные о квадрупольном моменте Q и параметре квадрупольной деформации β_2 атомных ядер (1922 набора данных для 1439 ядер), а также данные об их зарядовых радиусах (900 изотопов 90 элементов ($Z = 1-96$, $N = 0-152$));

- «Калькулятор порогов и энергий ядерных реакций» (http://cdfе.sinp.msu.ru/muh/calc_thr.shtml) – это реляционная БД, основанная на использовании современных и надежных данных о массах атомных ядер, которая позволяет рассчитывать значения характеристик ядерных реакций, а также в наглядной графической форме представлять результаты таких расчетов;

- «БД значений волновых функций» (http://cdfе.sinp.msu.ru/services/wftables/FirstPage_eng.htm) содержит волновые функции, необходимые для описания взаимодействия атомов и ионов с заряженными частицами и фотонами, а также для расчетов одноэлектронных (ионизация, возбуждение, перезарядка) и двухэлектронных (двухкратная ионизация, двухкратное возбуждение) сечений в области спектроскопии;

- БД «Вероятности внутренней конверсии изомерных переходов малой энергии» (<http://cdfе.sinp.msu.ru/cgi-bin/convers.cgi>) содержит данные о вероятностях внутренней конверсии изомерных переходов малой энергии (коэффициентов внутренней конверсии).

Создание Базы ядерных данных в Беларуси и перспективы ее применения для атомной энергетики

В основу проектных расчетов и прогнозирования процесса функционирования ядерных реакторов заложены фундаментальные константы, характеризующие свойства ядерных реакций, структуру ядер и свойства радиоактивного распада. От полноты и точности этих данных зависят радиационная и ядерная безопасность, а также экологическая приемлемость этих ядерных установок. Создание Базы ядерных данных в Беларуси позволит контролировать качество ядерных данных, поставляемых

потребителям, и обеспечить соответствие систем констант, закладываемых в технические проекты, современным международным стандартам.

Проект любой АЭС проходит стадию разработки – 5–7 лет и столько же стадию строительства. На момент ввода в эксплуатацию некоторые технологические процессы нуждаются в обновлении и модернизации – в этом состоит одна из задач научного сопровождения ввода в эксплуатацию и дальнейшего функционирования АЭС. Поддержание Базы ядерных данных невозможно без активного международного сотрудничества с ведущими научными центрами, где происходит накопление, обновление, тестирование и выработка рекомендаций по использованию ядерных данных.

Таким образом, необходимо:

1) создать информационно-техническую базу и организовать процесс обучения специалистов;

2) нацелить сотрудников Центра ядерных данных на решение следующих практических задач:

– расчет радиационной нагрузки на корпус реактора АЭС и другие узлы с целью оценки степени их радиационного износа в процессе эксплуатации;

– обеспечение организации безопасного хранения отработанного топлива с учетом остаточного тепловыделения за счет распада продуктов деления и прогнозирование его критичности в различных конфигурациях;

– оптимизация процессов загрузки и перегрузки топлива и выгорающих поглотителей, что позволит повысить экономичность и безопасность реактора и сэкономить значительные средства и ресурсы за счет более точного учета всех базовых констант, использованных в период проектирования АЭС.

Отметим, что это только самые первостепенные и неотложные задачи, к решению которых следует приступить немедленно. После их решения можно будет приступить к решению других, не менее важных, задач, которые уже выработаны мировой практикой эксплуатации АЭС.

В заключение авторы выражают благодарность руководителю Украинского центра ядерных данных О. О. Грицай, а также сотруднику этого центра О. И. Кальченко за плодотворные дискуссии и полезные замечания.

Литература

1. Ишханов, Б. С. Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами / Б. С. Ишханов, И. М. Капитонов. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1979. – 257 с.
2. Berman, B. L. Measurements of the giant dipole resonance with monoenergetic photons / B. L. Berman // Rev. Mod. Phys. – 1975. – Vol. 47. – P. 713–721.
3. Comment on photoneutron cross sections / Wolynech E. [et al.] // Phys. Rev. – 1984. – Vol. C29. – P. 1137–1139.
4. Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерные константы». – 2003. – № 1/2. – С. 48–89.
5. Bergere, R. L. Photoneutron cross sections of La, Tb, Ho and Ta / R. L. Bergere, H. Beil, A. Veysiere // Nucl. Phys. – 1968. – Vol. A121. – P. 463–481.
6. Relational Nuclear Databases Upon the MSU INP CDFE Web-site and Nuclear Data Centres Network CDFE Activities, Report on the IAEA Consultant's Meeting on the Coordination of Nuclear Reaction Data Centres, 28–30 May 2001, Vienna, Austria. INDC(NDS)-427, IAEA NDS / Boboshin I. N. [et al.]. – Vienna, Austria, 2001. – P. 49–58.
7. Экспериментальные данные по ядерным реакциям (EXFOR). – URL: <http://www-nds.iaea.org/exfor/exfor00.htm/>.

8. Экспериментальные данные по ядерным реакциям (EXFOR/CSISRS). – URL: <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor00.htm>.
9. Реляционная база данных по ядерным реакциям (EXFOR) ЦДФЭ НИИЯФ МГУ. – URL: <http://cdfc.sinp.msu.ru/exfor/index.php>.
10. Fuller, E. G. Photonuclear Data – Abstracts Sheets 1955–1982. NBSIR 83-2742 / E. G. Fuller, H. Gerstenberg. – U.S.A. National Bureau of Standards, 1986.
11. Варламов, В. В. Фотоядерные данные 1976–1995 : указатель / В. В. Варламов, В. В. Сапуненко, М. Е. Степанов. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1996. – 125 с.
12. Dietrich, S. S. Atomic Data and Nuclear Data Tables / S. S. Dietrich, B. L. Berman. – 1988. – Vol. 38. – P. 199–210.
13. Atlas of Giant Dipole Resonances. Parameters and Graphs of Photonuclear Reaction Cross Sections, INDC(NDS)-394, IAEA NDS / A. V. Varlamov [et al.]. – Vienna, Austria, 1999. – P. 19–31.
14. Мигдал, А. Б. Квадрупольное и дипольное γ -излучение ядер / А. Б. Мигдал // ЖЭТФ. – 1945. – № 15. – С. 81–94.
15. Goldhaber, M. On Nuclear Dipole Vibrations / M. Goldhaber, E. Teller // Phys. Rev. – 1948. – Vol. 74. – P. 1046–1052.
16. Steinwedel, H. Nuclear Photodisintegration / H. Steinwedel, Y. D. Jensen // Naturforsch. – 1950. – Vol. 5A. – P. 413–428.

Получено 17.11.2011 г.