

Программа МАГАТЭ по ядерным данным — ее роль в ядерном сообществе и услуги, предоставляемые развивающимся странам

Й. Й. Шмидт и А. Лоренц

ВВЕДЕНИЕ

Ядерные физические данные, или, более кратко, — ядерные данные включают все количественные результаты ядерных физических исследований и охватывают области ядерных взаимодействий, ядерной структуры и данных, касающихся ядерного распада. Ядерные данные находят широкое применение во всех отраслях ядерной науки и техники, при этом заметную роль играют нейтронные данные и данные о радиоактивном распаде. Несколько отдельных примеров могут проиллюстрировать существенное значение ядерных данных для развития ядерной науки и техники. Деление, вызванное нейтронами, которое является средством получения энергии в ядерных реакторах деления, характеризуется в количественном плане ядерными данными, которые зависят от энергии нейтронов. Реакция синтеза дейтронов и тритонов, составляющая основу современного проектирования реакторов синтеза, также характеризуется ядерными данными. Состояния распадающихся радионуклидов — продуктов деления и актинидов определяют энергию и интенсивность альфа, бета и гамма излучения, основные величины для организации обращения с ядерными отходами, для защиты ядерных энергетических установок, для учета и гарантирования неприкосновенности делящихся ядерных материалов.

СЕКЦИЯ ПО ЯДЕРНЫМ ДАННЫМ МАГАТЭ

Широкие потребности в ядерных данных для развития ядерной науки и техники и одновременное получение большого количества таких данных в ходе ядерных физических экспериментов по всему миру привели к необходимости международного сотрудничества по сбору, обмену и распространению ядерных данных на международной основе. На начальной стадии развития, в 1964 году, МАГАТЭ столкнулось с необходимостью международного обмена нейтронными данными и организовало программу по ядерным данным. Это легло в основу международного центра ядерных данных, которым в настоящее время занимается Секция по ядерным данным МАГАТЭ.

Секция по ядерным данным всегда занимала уникальное положение, занимаясь всеми аспектами ядерной науки и техники. Хотя первоначально предполагалось зани-

Й. Й. Шмидт является руководителем Секции по ядерным данным Отдела научных исследований и лабораторий МАГАТЭ; А. Лоренц — заместитель руководителя этой секции.

маться ядерными данными, требующимися для разработки реакторов деления на тепловых и быстрых нейтронах, программа ядерных данных МАГАТЭ, отражая развитие и значение национальных и международных ядерных программ, в течение последних нескольких лет расширила сферу своего действия, охватывая все ядерные данные. В настоящее время в дополнение к нейтронным ядерным данным, требующимся главным образом для развития атомной энергетики, сфера действия программы Секции по ядерным данным охватывает как данные о ядерных взаимодействиях, ядерных структурах и распаде, необходимые для обеспечения постоянного развития улучшенных ядерных методов и методик, так и атомные и молекулярные данные, требующиеся в области физики плазмы и технологии синтеза. Наибольшее значение имеет тот факт, что за последние годы Секция значительно расширила предоставление услуг в области ядерных данных развивающимся странам и поддержку их исследований по ядерным данным, удовлетворяя тем самым их растущие потребности, связанные с ростом интереса к атомной энергетике и другим видам применения ядерной энергии. В итоге в настоящее время Секция известна как центр ядерных данных, координирующий в международном масштабе отдельные исследования, собирающий, обменивающий и распространяющий точные ядерные данные, ответственный как за передачу ядерных данных главным образом из развитых в развивающиеся страны, так и за обмен ядерными данными между восточными и западными государствами-членами МАГАТЭ.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОМИТЕТ ПО ЯДЕРНЫМ ДАННЫМ

Программа Агентства по ядерным данным обладает собственной постоянной консультативной организацией — Международным комитетом по ядерным данным (МКЯД). Это обеспечивает руководство программами и деятельностью Секции по ядерным данным в соответствии с требованиями ядерных программ основных (развитых и развивающихся) ядерных государств-членов Агентства.

МКЯД был образован МАГАТЭ в 1967 году в качестве постоянного комитета МАГАТЭ с объявленной целью "служить средством развития международного сотрудничества на всех этапах общепользуемой деятельности в области ядерных данных для ядерных энергетических программ и других видов мирного применения атомной науки и техники и для консультирования Генерального директора МАГАТЭ в области ядерных данных". Этот комитет, ограниченный в настоящее время тринадцатью членами, состоит из ведущих ученых в области ядерной физики из государств-членов МАГАТЭ, осуществляющих основную деятельность в области ядерных данных. Для стран, не представленных в МКЯД, имеется сорок офицеров связи, обеспечивающих прямые контакты ученых этих стран с МКЯД через Секцию по ядерным данным. Функции секретариата МКЯД осуществляет Секция под управлением ее руководителя, который одновременно является ученым секретарем МКЯД. Комитет собирается на заседания примерно каждые 18 месяцев.

Способствуя международному сотрудничеству в области ядерных данных, МКЯД — в дополнение к своим консультативным функциям по отношению к программе по ядерным данным МАГАТЭ — тесно связан с Секцией по ядерным данным в области координации ряда мероприятий по ядерным данным, имеющих международное значение. Ответственность комитета за оценку потребностей в ядерных данных и их наличия, за координацию измерения, расчета, сбора ядерных данных, обмена ими и их распространение находит отражение во многих функциях Секции.

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО ЦЕНТРОВ ДАННЫХ

В 1970 году четыре региональных центра нейтронных данных, выступая под эгидой Секции по ядерным данным МАГАТЭ, согласились распределить свои обязанности по географическому принципу и начать обмен экспериментальными нейтронными ядерными данными на основе общей совместимой для расчетов на ЭВМ формы обмена, названной EXFOR. Это следующие центры данных:

- Центр сбора нейтронных данных Агентства по ядерной энергии (АЯЭ) ОЭСР (ныне часть Банка данных АЯЭ), расположенный в Сакле, Франция, и обслуживающий главным образом развитые страны Западной Европы и Японию;
- Национальный центр нейтронных сечений (ныне Национальный центр ядерных данных), расположенный в Брукхейвенской национальной лаборатории, США, обслуживающий США и Канаду;
- Центр ядерных данных СССР, расположенный в Физико-энергетическом институте в Обнинске, СССР, обслуживающий СССР, и
- Секция по ядерным данным МАГАТЭ, расположенная в Вене, Австрия, обслуживающая главным образом развивающиеся страны Азии (за исключением Японии), Африки, Центральной и Южной Америки, Восточной Европы, а также Австралию и Новую Зеландию.

Каждый из этих четырех центров нейтронных данных собирает все экспериментальные нейтронные данные по обслуживаемому району, направляет эти данные другим центрам по согласованной форме и отвечает на запросы относительно нейтронных данных, поступаемые от потребителей обслуживаемого района. Все операции полностью компьютеризованы. Обмен данными обеспечивает каждому потребителю в мире доступ к полному объему экспериментальных нейтронных данных.

Аналогичную цель — договориться о свободном обмене и распределении оцененных нейтронных данных по сети "Четырех центров" — столь же быстро реализовать не удалось. Однако в настоящий момент большинство существующих файлов оцененных нейтронных данных доступны без ограничений. Каждый год Секция по ядерным данным проводит совещания четырех центров нейтронных данных для координации международного сбора нейтронных ядерных данных, обмена ими и их распределения.

Постоянно растущее значение ядерных методов и применение изотопов в дальнейшем привели к образованию новых сетей центров данных, накапливающих данные о ядерном взаимодействии заряженных частиц и данные о ядерной структуре и распаде, в целях обеспечения эффективного сбора этих данных и предоставления их потребителям.

КОМПЬЮТЕРИЗОВАННЫЕ БИБЛИОТЕКИ ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ И ПУБЛИКАЦИИ СЕКЦИИ ПО ЯДЕРНЫМ ДАННЫМ МАГАТЭ

В результате сотрудничества центров данных Секция по ядерным данным располагает большей частью ядерных данных, получаемых во всем мире. Помимо библиотеки EXFOR, содержащей экспериментальные нейтронные и другие данные о ядерных взаимодействиях, которая в настоящее время насчитывает 2,6 млн. записей цифровых данных, Секция обслуживает в настоящее время около 40 различных библиотек оцененных ядерных данных и периодически обновляемых фондов, начиная от больших всеобъемлющих файлов общего назначения до меньших файлов специального применения. Эти библиотеки содержат 1,8 млн. записей цифровых

Компьютеризованные библиотеки ядерных данных, имеющиеся в распоряжении Секции по ядерным данным МАГАТЭ

A. Библиотека экспериментальных данных о ядерных взаимодействиях	Число записей цифровых данных
Библиотека EXFOR	2 600 000
<hr/>	
B. Библиотеки оцененных ядерных данных	
1. Стандартные поперечные сечения	15 000
2. Файлы нейтронных сечений общего назначения	700 000
3. Выходы, сечения и постоянные распада изотопов – продуктов деления	500 000
4. Ядерные данные для дозиметрии реакторных нейтронов	40 000
5. Ядерные данные для оценки радиационных повреждений	7 000
6. Нейтронные сечения и постоянные распада для актинидов	50 000
7. Специальные многогрупповые нейтронные сечения	40 000
8. Нейтронные резонансные параметры	100 000
9. Данные о ядерной структуре и распаде	350 000
10. Атомные массы	2 000
	<hr/>
	1 800 000
<hr/>	
Всего (A+B)	4 400 000

данных; их классификация дана в приводимой ниже таблице. Небольшая группа программирования внутри Секции разрабатывает и эксплуатирует системы программ, необходимые для машинной обработки этих библиотек, и выполняет операции, связанные с вводом и выводом данных.

Из этих библиотек Секция направляет по запросам большое количество ядерных данных различных форматов от небольших подборок данных специального типа до законченных файлов данных на магнитной ленте, а также взаимосвязанную документацию и описательную информацию, такую, как каталоги, описания форматов библиотеки данных, их содержания и т.д. Для уведомления о своих услугах, о наличии обновленных фондов или новых добавлений к файлам данных Секция рассылает несколько раз в год всем потребителям в обслуживаемом районе Информационный бюллетень о ядерных данных.

Возможно, наиболее известной публикацией в результате совместных усилий центров является указатель литературы по микроскопическим нейтронным данным, БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ – КНИГА 22, НОМЕР 2

CINDA, ежегодно публикуемый МАГАТЭ от имени этих центров данных. CINDA является результатом систематического просмотра литературы по нейтронной физике, публикуемой во всем мире; это всеобъемлющий и новейший справочник по всей библиографии, касающейся измерений, расчета и оценки нейтронных данных, который стал незаменимым инструментом для ученых и инженеров, работающих в ядерной области.

Сбор данных для CINDA полностью компьютеризован, данные постоянно обновляются четырьмя центрами нейтронных данных, и этот документ служит также указателем международной библиотеки экспериментальных нейтронных данных EXFOR, основной файл CINDA ведется Банком данных АЯЭ.

Секция выпускает три серии отчетов: ежегодный — “Достижения в области ядерных данных о продуктах деления” с информацией о деятельности в области измерения, накопления и оценки ядерных данных о продуктах деления; двухгодичный — “Накопление и оценка данных о ядерной структуре и распаде”, дающий информацию о наличии опубликованных сборников данных по ядерной структуре и распаду, и обычно двухгодичный “Всемирный перечень требуемых ядерных данных” WRENDA, в котором перечисляются потребности 15-20 государств-членов МАГАТЭ в улучшенных ядерных данных для реакторов деления и синтеза и для охраны ядерных материалов.

Как секретариат МКЯД Секция по ядерным данным координирует регистрацию и распределение документов МКЯД, состоящих в основном из технических отчетов по вопросам, касающимся ядерных данных, которые приходят из государств-членов. В то же время серии отчетов МКЯД используются Секцией для публикации своих собственных отчетов. Секция организует также перевод на английский язык отдельных публикаций и отчетов СССР по ядерным данным и рассылает их по всему миру. Протоколы совещаний, созываемых Секцией, обычно публикуются как технические отчеты МАГАТЭ в серии МАГАТЭ-ТЕХДОК.

В отдельных случаях, если имеются повсеместные потребности в разнообразных небольших комплексах данных, наиболее удобным средством распространения данных является справочник. Так обстояло дело со справочником по ядерным сечениям активации, который был подготовлен Секцией по ядерным данным и опубликован в 1974 году [1], для удовлетворения потребностей в ядерных данных о различных видах применения методов ядерного активационного анализа.

УСЛУГИ РАЗВИВАЮЩИМСЯ СТРАНАМ

Секция по ядерным данным Агентства служит ключевым пунктом передачи ядерных данных, соответствующей информации и технологии из развитых стран в развивающиеся страны, интересующиеся ядерными проблемами. Это включает следующую деятельность и обязательства:

- распространение надежных ядерных данных и соответствующей информации по запросам вместе с указаниями об их правильном использовании;
- сбор ядерных данных, получаемых в развивающихся странах, и их международное распространение с помощью сетей центров ядерных данных;
- стимулирование создания комитетов и центров ядерных данных в более крупных развивающихся странах (например, в Аргентине, Бразилии, Индии, Румынии) ;

- подготовка в Агентстве ученых из развивающихся стран, работающих в ядерной области, по вопросам использования компьютеризованных библиотек ядерных данных (например, Бразилия, Румыния) ;
- стимулирование и поддержка работ по измерению и оценке необходимых ядерных данных посредством заключения исследовательских контрактов, поставок материалов высокой чистоты и изотопов, необходимых для таких измерений. На сегодняшний день такую поддержку получили исследовательские лаборатории в Аргентине, Бангладеш, Бразилии, Венгрии, Греции, Египте, Индии, Пакистане, Польше, Румынии, Турции и Югославии;
- организация двухгодичных подготовительных курсов в сотрудничестве с Международным центром теоретической физики в Триесте для ученых из 25-30 развивающихся стран по использованию теории ядра для расчета ядерных данных и по методам оценки и машинной обработки ядерных данных [2, 3].

В итоге в настоящее время Секция по ядерным данным МАГАТЭ предоставляет бесплатные услуги центров данных ученым примерно сорока государств-членов МАГАТЭ, в первую очередь развивающихся стран. Предоставляя эти услуги, Секция обеспечила понимание потребностей в ядерных данных в науке и технике во всех районах мира.

ПОТРЕБНОСТИ В ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

В целом точное знание ядерных данных требуется в любом случае применения ядерных взаимодействий, радиации и изотопов в науке и технике. Следовательно, ядерные данные имеют отношение ко многим ядерным программам Агентства и государств-членов. В следующих разделах дается очень краткое описание этих потребностей для отдельных областей.

Проектирование реакторов деления

Наибольшие и наиболее жесткие требования к точности ядерных данных, особенно к нейтронным сечениям, предъявляются при проектировании реакторов деления. Такие параметры реактора, как эффективный коэффициент размножения $K_{эфф}$, критическая масса, обогащение топлива, критические размеры реактора, поток нейтронов, коэффициент воспроизводства, коэффициенты безопасности, кинетические и динамические характеристики, рассчитываются из математических уравнений, в которые в качестве основных величин входят нейтронные сечения и связанные с ними ядерные данные.

Ответ на вопрос "Какие ядерные данные требуются для реакторов деления и в какой очередности?" определяется составом материалов и энергетическим спектром нейтронов в данном реакторе. В целом, нейтронные сечения нужны для всех реакторных материалов во всем энергетическом диапазоне, перекрывающемся энергетическим спектром нейтронов реактора.

Диапазон взаимодействий в тепловом реакторе простирается от 0,01 до 1 эВ; нейтроны быстрого реактора занимают значительно больший энергетический диапазон, от энергии порядка 1 эВ и почти до 10 МэВ, с основным распределением энергии в диапазоне между 1 кэВ и несколькими МэВ.

Следовательно, в тепловом реакторе требуется знание сечений деления, захвата и упругого рассеяния главным образом в небольшом диапазоне энергий от 0 до 1 эВ,

а также свойств нескольких первых резонансов в сырьевом и делящемся материале, которые являются определяющими для вычисления физических характеристик реактора.

В быстрых реакторах в дополнение к параметрам деления, захвата, упругого рассеяния и резонансов выше уровня сплошного резонанса должны быть известны и сечения неупругого рассеяния, реакций взаимодействий при больших энергиях (n, p) , (n, α) , $(n, 2n)$, $(n, 3n)$, а также угловое и энергетическое распределение излучаемых нейтронов как функция энергии нейтронов в диапазоне энергий порядка от кэВ до МэВ.

Для различных вариантов как тепловых, так и быстрых реакторов должны быть известны нейтронные сечения для следующих материалов и изотопов (упоминаются только наиболее важные) :

делящиеся изотопы	уран-233, 235, плутоний-239, 241;
сырьевые материалы	уран-238, плутоний-240, торий-232;
конструкционные материалы	железо, хром, никель, цирконий;
теплоносители	легкая вода, тяжелая вода, гелий, двуокись углерода, натрий;
замедлители	легкая вода, тяжелая вода, бериллий, углерод;
материалы регулирующих стержней	бор, тантал;
материалы защиты	железо, свинец, барий, кремний;
топливо	кислород для окисного топлива, углерод для карбидного топлива.

Современные расчеты теории реакторов, выполняемые с помощью ЭВМ, настолько совершенны, что позволяют точно предсказывать физические характеристики реакторов деления при условии, что используемые нейтронные сечения являются подробными и точными. В то время как нейтронные сечения низких энергий, необходимые для тепловых реакторов, в большинстве своем сейчас известны с достаточной точностью, сечения быстрых нейтронов для основных частей быстрых реакторов еще нуждаются в улучшении [4] и изучаются в первую очередь в странах, где имеются проекты реакторов-размножителей на быстрых нейтронах.

Обращение с отходами — продуктами деления и актинидами

Сравнительно недавно в связи с расширением ядерных программ во многих странах, охватывающих от нескольких до значительного количества энергетических реакторов, заводы по изготовлению топлива и его химической переработке, транспортировку свежего и отработанного ядерного топлива и т.д., стало уделяться возрастающее внимание проблеме накопления продуктов деления и актинидов, получающихся в реакторах. За исключением некоторых специфических видов применения, таких, как использование α -распада плутония-238 и кюрия-244 как источников тепла в ядерных батареях на спутниках, ни продукты деления, ни большинство актинидов не могут в дальнейшем использоваться в реакторе (за исключением возможного сжигания актинидов в реакторах специального назначения) и должны быть удалены.

В настоящее время в государства-членах проводятся экспериментальные и теоретические исследования в следующих направлениях:

- Образование продуктов деления и актинидов в реакторах и их влияние на эксплуатацию реактора;
- выделение тепла после остановки реактора, так называемое остаточное тепловыделение, вызванное α -, β - и γ -распадом продуктов деления и нуклидов актинидов, запаздывающим делением, спонтанным делением и нейтронами реакции (α, n);
- проблемы кратковременной защиты от продуктов деления и актинидов при перегрузках, переработке и транспортировке топлива;
- долговременная радиоактивная опасность отходов — продуктов деления и актинидов — опасность критичности в актинидах, которые являются источниками нейтронов вследствие спонтанного деления, реакций (γ, n) и (α, n).

Для этих исследований требуется большое количество точных ядерных данных.

Объем требований может быть частично проиллюстрирован количеством охватываемых изотопов, как это показано в приводимой ниже таблице:

Тип нуклида	Полное число превращений	Существенные
Продукты деления	800	≥ 50
Актиниды	200	≥ 30

В качестве критериев при этом отборе использовались длинные периоды полураспада, большие выходы, большие сечения захвата и деления. При расчете остаточного тепловыделения многие нуклиды с малым периодом полураспада имеют лишь кратковременное значение, например короткоживущие продукты деления, и они не включены в категорию существенных.

В итоге необходимы следующие ядерные данные [4]:

- внутри реактора:** все нейтронные сечения, особенно сечения захвата, выходы, данные по запаздывающим нейтронам для продуктов деления; все нейтронные сечения, особенно сечения деления и захвата, — для актинидов; диапазон энергии нейтронов: 0-15 МэВ;
- вне реактора:** характеристики α -, β -, γ -распада и спонтанного деления, период полураспада, энергия и интенсивность излучения для продуктов деления и актинидов: (γ, n) и (α, n) взаимодействия, особенно в материалах с малым числом Z .

В ряде стран все еще проводится большая экспериментальная и теоретическая деятельность для удовлетворения потребностей в этих данных.

Охрана ядерных материалов

В целом потребности в ядерных данных в этой области относятся главным образом к методам неразрушающего контроля. Приведем два важных примера из области

текущих потребностей. Для точного определения изотопного состава ядерного топлива путем измерения выгорания необходимо знать выходы γ -лучей в области от единиц кэВ до МэВ для отдельных продуктов деления (например, рутения-103, цезия-134, лантана-140, цезия-144, празеодима-144) с точностью до 1% [4]. Другим примером является γ -спектрометрический анализ изотопов плутония в топливе, при котором требуется регистрировать выход на α -распад отдельных γ -лучей для изотопов плутония-238, 239, 240, 241, также с точностью 1% [4]. Существующие экспериментальные данные о выходах еще далеки от этой точности.

Проектирование реакторов синтеза

На современном уровне исследований и разработки реакторов синтеза потребности в нейтронных данных намного превосходят потребности в данных по заряженным частицам. При использовании реакции $T(d, n)$ реактор синтеза является действительно сильным источником нейтронов с энергией 14 МэВ с потоками на внутренней стенке плазмы, сравнимыми по величине с потоками высокопоточного реактора деления. Эти нейтроны проходят через литиевый отражатель и, замедляясь, приходят к энергетическому распределению, в котором основная часть энергии относится к диапазону от 5 до 14 МэВ. Этот энергетический диапазон приобретает, таким образом, наибольший интерес. Так как нейтроны этих энергий имеют лишь ограниченное значение в быстрых реакторах-размножителях, то существуют пробелы для ряда сечений взаимодействия, которые должны быть восполнены [4]. Приобретают важное значение реакции (n, p) , (n, d) , (n, α) , (n, T) , $(n, {}^3\text{He})$, $(n, 2n)$, а также угловое и энергетическое распределение излучаемых вторичных частиц. Материалы, для которых требуются эти и другие данные (для расчета экономии нейтронов, коэффициентов радиационных повреждений и скорости превращений), являются главным образом конструкционными материалами, которые предполагается использовать в реакторах синтеза, такие, как титан, ванадий, хром, марганец, железо, никель, цирконий, ниобий, молибден и вольфрам. Особый интерес представляет реакция $(n, 2n)$ в материалах первой стенки, так как это приводит к размножению нейтронов вследствие воспроизводства трития в литиевом отражателе. Тритий получается в отражателе в результате реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ и ${}^7\text{Li}(n, n'\alpha)\text{T}$.

В настоящее время проводится много работ в целях точного определения энергетической зависимости этих и многих других конкурирующих реакций между нейтронами и двумя изотопами лития в диапазоне энергий нейтронов порядка МэВ. Нынешние требования к точности в отношении важнейшей реакции воспроизводства ${}^7\text{Li}(n, n'\alpha)\text{T}$ составляют около 5-10% [4]; имеющиеся экспериментальные данные пока дают точность около 25%, серьезно влияя, таким образом, на результаты предсказания воспроизводства трития.

ПОТРЕБНОСТИ В ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗОТОПОВ И РАДИАЦИИ В ЯДЕРНОЙ НАУКЕ

В противоположность весьма компактным потребностям в области атомной энергетики, потребности в ядерных данных для прикладных ядерных наук носят более разнородный и широкий характер; их объем растет вследствие большого разнообразия видов прикладного применения. Потребности в ядерных данных появились в таких разнообразных областях, как медицинская ядерная дозиметрия, диагностика и терапия, ядерная химия, геонауки, археология, гидрология, исследования окру-

жающей среды и астрофизика [5]. Ниже излагаются некоторые наиболее важные виды применения и использования ядерных данных в этих целях.

Ядерный активационный анализ

Для этого аналитического метода должны быть известны сечения ядерной активации нейтронами, заряженными частицами и фотонами, данные по периодам полураспада, а также энергии и интенсивности вторичного излучения. В качестве одного из многих примеров упомянем проект Департамента исследований и изотопов МАГАТЭ по нейтронному активационному анализу загрязняющих веществ в вопросах человека для измерения степени загрязнения окружающей среды ядовитыми нерадиоактивными веществами. Для этого проекта потребовались наиболее точные значения сечений нейтронной активации, времени полураспада, энергии γ -излучения и его интенсивности для всех изотопов следующих элементов: мышьяк, серебро, бром, кадмий, хлор, медь, ртуть, калий, марганец, натрий, сурьма, селен и цинк.

Методы меченых атомов

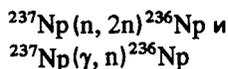
Методы меченых атомов требуют знания периодов полураспада и характерных свойств распада радиоизотопов, применяемых в качестве индикаторов. Из множества возможных примеров укажем на применение трития и других радиоизотопов для гидрологических исследований поверхностных вод и на применение радиоизотопов йода для медицинской диагностики.

Производство радиоизотопов

Для определения и оптимизации скорости производства и чистоты желаемого радиоизотопа необходимо учитывать как все реакции, приводящие к образованию этого изотопа, так и реакции, приводящие к образованию других нежелательных изотопов. Примером является производство чистого плутония-238, который используется в качестве источника тепла для термоэлектрического преобразователя задатчика ритма сердца [5]. Плутоний-238 может быть получен в результате облучения нейтронами нептуния-237 в реакторе на основе реакции



Такие конкурирующие реакции, как



происходят самопроизвольно и приводят через β -распад нептуния-236 к образованию плутония-236. Этот изотоп является нежелательным побочным продуктом, так как обладает более энергичным γ -излучением более высокой интенсивности, чем плутоний-238, γ -излучение которого в основном лежит в диапазоне энергий ниже 150 кэВ и защита от которого не составляет сложности. Поэтому энергию нейтронного облучения надо оптимизировать таким образом, чтобы образование плутония-236 происходило только на допустимом минимуме. Для вычисления оптимальных условий облучения должны быть известны сечения вышеупомянутых реакций с окружающими реактор материалами.

Облучение ядерными частицами

При ядерных облучениях должны быть известны сечения взаимодействия падающих частиц с ядрами облучаемого образца, а также угловое и энергетическое распределение испускаемых частиц и излучений в результате этого взаимодействия.

В качестве примера упомянем типичное биомедицинское применение излучений, т.е. лечение рака с помощью нейтронного облучения пораженных тканей. Для производства нейтронов, обычно на основе реакции ${}^9\text{Be}(d, n)$, используются циклотроны. Должны быть известны сечение этой реакции и выходы, угловое и энергетическое распределение излучаемых нейтронов для мишеней различной толщины и энергии дейтронов до величины порядка 50 МэВ. Более того, необходимо знать сечения и распределения вторичных частиц для всех возможных взаимодействий нейтронов с энергией 15-50 МэВ, образующихся при реакции ${}^9\text{Be}(d, n)$ с основными составляющими человеческого тела (водород, углерод, азот, кислород, фосфор и кальций) для предсказания распределения дозы облучения в облучаемых частях тела. Данных для этого, особенно нейтронных, пока еще недостаточно.

ПОЛОЖЕНИЕ В ОБЛАСТИ ОЦЕНКИ ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ И СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОТРЕБНОСТИ

Как следствие этого роста потребностей научного и технического сообщества в точных ядерных данных за последние 20 лет центрами ядерных данных, научно-исследовательскими лабораториями и потребителями ядерных данных во всем мире были предприняты совместные усилия под руководством национальных, региональных и международных комитетов ядерных данных. Эти усилия направлены на выявление и критическую оценку потребностей в ядерных данных и на стимулирование, поддержку и координацию систематического получения и распространения требуемых данных.

WRENDA: ВСЕМИРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ПОТРЕБНОСТЕЙ В ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ

Одним из аспектов этих совместных усилий было создание основанного на ЭВМ всемирного перечня потребностей в ядерных данных, получившего название WRENDA. Секция по ядерным данным МАГАТЭ содержит основной файл WRENDA, обновляет его за счет данных, получаемых от 15-20 государств-членов МАГАТЭ, и публикует его каждые два года от имени четырех центров данных. Последний выпуск, WRENDA 79/80 [4] содержит почти 1800 заявок на измерения и оценку (главным образом нейтронных) ядерных данных; эти заявки были подготовлены специалистами в области реакторов деления, реакторов синтеза и разработки средств защиты; до передачи в МАГАТЭ они критически оцениваются и отбираются национальными комитетами по ядерным данным. Состояние требуемых стандартных справочных данных и других данных, имеющих решающее значение, находится под постоянным контролем МКЯД МАГАТЭ и Комитета по ядерным данным Агентства по ядерной энергии ОЭСР (КЯД/АЯЭ).

В этом перечне каждая отдельная заявка дает информацию о требуемом параметре определенного нуклида, об интересующем диапазоне энергий, требуемой точности и срочности, источнике и цели запроса.

Типичный запрос имеет следующий вид:

Запрашиваемая величина:	3 литий 6 (л, тритон) Альфа
Энергия:	1 кэВ — 3 МэВ
Точность:	1%
Очередность:	1
Страна:	США
Проситель:	С. Е. Тилл, Аргоннская национальная лаборатория, П. Б. Хеммиг, Департамент энергетики США
Примечания:	Точность 3% будет полезна; энергетическое разрешение должно воспроизводить реальную картину.
Цель:	Для применения в качестве стандарта.

В следующей таблице приводится классификация заявок WRENDA 79/80 по основным областям применения в сравнении с предыдущим изданием, WRENDA 76/77.

Область применения	WRENDA 76/77	WRENDA 79/80
Деление	1194	1210
Синтез	328	449
Защита	150	121
Всего	1672	1780

Для реакторов деления число заявок остается почти постоянным; хотя число заявок на ядерные данные относительно продуктов деления сократилось, отмечается увеличение числа заявок в отношении радиационных повреждений, защиты и вторичных актинидов. Единственным другим существенным изменением явилось увеличение числа заявок в области ядерного синтеза, которое увеличилось более чем на 100 заявок, отражая возрастающий интерес к синтезу. Однако обновление характера заявок по сравнению с предыдущим изданием весьма значительно: 465 заявок WRENDA 76/77 были сняты, 487 заявок модифицированы, 573 заявки, т. е. примерно одна треть, являются новыми.

Перечень заявок WRENDA, помимо выявления специфических пробелов в наличии требуемых ядерных данных, обладает тем преимуществом, что приводит в одном месте сжатую сводку текущих потребностей в ядерных данных и доказал свою полезность для стимулирования и координации измерений ядерных данных. Он также используется Секцией по ядерным данным в качестве обоснования для поддержки деятельности по измерению ядерных данных в малых и развивающихся странах.

НАУЧНЫЕ СОВЕЩАНИЯ

Дальнейшим способом выяснения масштаба современных потребностей в ядерных данных в специфических областях приложения и степени их удовлетворения являются различного типа научные совещания. На таких совещаниях Секция по ядерным данным МАГАТЭ объединяет потребителей и производителей ядерных данных. На недавних совещаниях рассматривались следующие темы: ядерные данные о про-

БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ — КНИГА 22, НОМЕР 2

дуктах деления [6, 7], ядерные данные о трансактиниевых изотопах [8, 9], ядерные данные для ядерной реакторной дозиметрии [10] и ядерные данные для технологии реакторов синтеза [11].

В дополнение к этим совещаниям, которые специально предназначены для одновременной оценки наличия данных и потребностей в них, Секция проводит также обычные научные совещания с рассмотрением определенных вопросов, касающихся ядерных данных или областей их применения. Эти совещания по своему масштабу охватывают широкий диапазон, начиная от таких крупных конференций, как конференции по нейтронным данным для реакторов в 1966 и 1970 годах [12, 13] и по ядерным данным в интересах науки и техники в 1973 году [5], специальные совещания среднего масштаба по стандартным ядерным данным [14, 15], по сбору и оценке данных [16, 17] и по свойствам источников нейтронов [18], и кончая небольшими консультативными совещаниями [19, 20, 21].

КООРДИНАЦИЯ И ПОДДЕРЖКА СЕКЦИЕЙ ПО ЯДЕРНЫМ ДАННЫМ МАГАТЭ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ

В контексте уставной ответственности МАГАТЭ за помощь государствам-членам в развитии мирного использования атомной энергии Секция на протяжении последних 10 лет поддерживала исследовательские программы, через посредство которых она может размещать фонды для целей измерения и оценки ядерных данных. Эта поддержка охватывает деятельность, начиная от отдельных исследовательских контрактов и соглашений с участием односторонних исследовательских групп и кончая программами координированных исследований с участием ряда лабораторий как из развивающихся, так и из развитых стран. Рекомендации МКЯД, выводы и рекомендации научных совещаний, проводимых Секцией по ядерным данным, и перечень заявок WRENDA используются в качестве основного материала для принятия решений, связанных с поддержкой и координацией этих исследований.

Как следствие рекомендаций первого совещания Консультативной группы Агентства по ядерным данным о трансактиниевых изотопах [8] в 1977 году были организованы две скоординированные исследовательские программы с участием восьми развитых стран (Великобритания, Италия, СССР, США, Федеративная Республика Германии, Франция, Швеция и Япония), трех развивающихся стран (Израиль, Индия и Румыния) и одной международной организации (Центральное бюро ядерных измерений Комиссии европейских сообществ). Предметом первой из этих двух программ является сравнение методов и результатов различных оценок нейтронных ядерных данных об актинидах. Она ставит двойную цель улучшения точности оценки нейтронных данных об актинидах, требующихся для реального расчета накопления и выгорания актинидов в реакторах деления, и подготовки участников из развивающихся стран в области оценки таких данных применительно к конкретным нуждам ядерных энергетических программ их стран. Оценки, производимые участниками, собираются в библиотеке ядерных данных МАГАТЭ для актинидов.

Вторая программа заключается в измерении и оценке параметров распада (периоды полураспада, α и γ -спектры) для изотопов актинидов. Эта программа преследует цели получения комплекса высокоточных и совместимых данных по распаду для удовлетворения потребностей в области анализа ядерного топлива, охраны ядерных материалов, определения массы, подготовки и применения радиоизотопных стандартов.

НАПРАВЛЕНИЯ БУДУЩЕЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

По мере развития атомной энергетики и прикладных ядерных наук в развивающихся странах, их научные и технические возможности будут нуждаться в укреплении. Это потребует расширения усилий по передаче технологии и ноу-хау для целей ядерных измерений и подготовки ученых развивающихся стран в области ядерных методов и технологии. Это потребует также лучшей координации изолированных и разрозненных исследований, которые проводятся во многих этих странах. Как указано в последнем издании WRENDA, в определенных областях ядерных данных еще предстоит провести большой объем работ. Большое значение измерения ядерных данных при подготовке специалистов в области широко используемых ядерных методов и технологии и наличие соответствующих измерительных устройств в ряде развивающихся стран говорят о целесообразности более широкого будущего сотрудничества на межрегиональной основе. Это сотрудничество должно включать организацию сдвоенных исследовательских групп развивающихся и развитых стран, совместно ведущих полезную и необходимую работу по исследованию ядерных данных.

Библиография

- [1] Handbook on Nuclear Activation Cross-Sections, Technical Report Series No. 156, STI/DOC/10/156, IAEA, Vienna (1974).
- [2] Nuclear Theory for Applications, (Proc. Joint IAEA/NDS – ICTP Trieste Course, ICTP Trieste 1978) Technical Report IAEA-SMR/43, Vienna (1980).
- [3] Nuclear Theory for Applications (Proc. Joint IAEA/NDS-ICTP Trieste Interregional Advanced Training Course, ICTP Trieste 1980), Technical Report to be published.
- [4] WRENDA 79/80, "World Request List for Nuclear Data", edited by D.W. Muir, IAEA/NDS; INDC(SEC)-73/URSF (October 1979).
- [5] Nuclear Data in Science and Technology, (Proc. Symp., Paris 1973), STI/PUB/343, IAEA, Vienna (1973).
- [6] Fission Product Nuclear Data, (Proc. Panel Meeting, Bologna 1973), Technical Report IAEA-169, IAEA, Vienna (1974).
- [7] Fission Product Nuclear Data, (Proc. Advisory Group Meeting, ECN Petten, Netherlands, 1977), Technical Report IAEA-213, IAEA, Vienna (1978).
- [8] Transactinium Isotope Nuclear Data, (Proc. Panel, Karlsruhe 1975), Technical Report IAEA-186, IAEA, Vienna (June 1976).
- [9] Transactinium Isotope Nuclear Data, (Proc. Advisory Group Meeting, CEN-Cadarache, France, 1979), Technical Report IAEA-TEC-DOC-232, IAEA, Vienna (to be published).
- [10] Neutron Cross-Sections for Reactor Dosimetry, (Proc. Consultants Meeting, Vienna 1976), Technical Report IAEA-208, IAEA, Vienna (1978).
- [11] Nuclear Data for Fusion Reactor Technology, (Proc. Advisory Group Meeting, Vienna 1978), Technical Report IAEA-TEC-DOC-223, IAEA, Vienna (1979).
- [12] Neutron Data for Reactors, (Proc. Conf., Paris 1966), STI/PUB/140, IAEA, Vienna (1967).
- [13] Second Int. Conf. on Nuclear Data for Reactors, (Proc. Conf., Helsinki 1970), STI/PUB/259, IAEA, Vienna (1970).
- [14] Nuclear Standards for Neutron Measurements, (Proc. Panel Meeting, Brussels 1967), Technical Report IAEA-107, IAEA, Vienna (1968).
- [15] Neutron Standard Reference Data, (Proc. Panel Meeting, Vienna 1972), STI/PUB/371, IAEA, Vienna (1974).
- [16] An International Neutron Data System, (Proc. Panel Meeting, Brookhaven 1969), Technical Report Series No. 100, IAEA, Vienna (1969).
- [17] Neutron Nuclear Data Evaluation, (Proc. Panel Meeting, Vienna 1971), Technical Report Series No. 146, IAEA, Vienna (1973).
- [18] Neutron Source Properties, (Proc. Consultants Meeting, Debrecen, Hungary, March 1980), INDC report (to be published).
- [19] Meeting on the status of $\bar{\nu}$ data for the main fissile nuclides, IAEA, Vienna (June 1970), (see At. Energy Rev. 10, 4 (1972), p.637).
- [20] Prompt Fission Neutron Spectra, (Proc. Consultants Meeting, Vienna 1972), STI/PUB/329, IAEA, Vienna (1972).
- [21] Delayed Neutron Properties, (Proc. Consultants Meeting, Vienna, March 1979), INDC(NDS)-107/G+Special (1979).