

Применение метода усредненных резонансов (МУР) в реакциях захвата протонов низких энергий

Б.А.Немашкало

ИФВЭЯФ ННЦ ХФТИ, г. Харьков

Появление метода усредненных резонансов в ХФТИ как научного направления в ядерной спектроскопии связано с работой [1], в который впервые в 1970 г. было предложено использовать статистическую теорию для анализа экспериментальных данных из реакции захвата протонов, измеренных в условиях статистического усреднения. Реакции с протонами подбарьерных энергий являются удобным и широко используемым методом ядерной спектроскопии. При этом изучение изолированных резонансов являлось одним из наиболее плодотворных и прецизионных методов, однако, применение его было существенно ограничено легкими ядрами. Потребность в данных для ядер с $A > 40$ привела к разработке новых методов и методик. Для этих ядер плотность высоковозбужденных состояний настолько велика, что становится оправданным применение статистических методов анализа оперирующих понятиями средних сечений, плотности уровней, статистических тензоров, силовых функций и др.

Успех применения МУР обеспечивался нашим знанием того, что:

- сечения заселения конечных состояний ядер в реакциях захвата в случае применения полутолстых мишеней, позволяющих экспериментально реализовать статистические условия, являются достаточными для постановки экспериментов по измерению угловых распределений, функций возбуждения и даже угловых корреляций;

- конечные состояния являются выстроенными, несмотря на статистический характер их заселения, поэтому угловые распределения гамма-лучей имеют значительную асимметрию и могут, таким образом, быть использованы в ядерной спектроскопии по прямому назначению;

- статистическая модель к этому времени уже получила свое полное развитие и ее применение для анализа частичных реакций было завершено. Для решения ее внутренних проблем были привлечены оптическая модель, модель Ферми газа и испарительная модель. В работах Хаузера, Фешбаха и Сатчлера была полностью учтена кинематика реакций и получены выражения для сечений ядерных реакций.

Теоретически вопрос о применении МУР к анализу реакций захвата был решен в наших работах [2] и др.

Трудности применения статистической модели были связаны с выбором параметров оптического потенциала (которые хорошо известны при более высоких энергиях) и отсутствием данных о радиационных силовых функциях (РСФ), изучение которых стало в дальнейшем одной из задач, имеющих самостоятельное значение, так же как определение каскадности излучения, спектров множественности, изучение механизма реакций захвата и др.

Работа была выполнена в четыре основных этапа. Первый этап состоял в разработке **метода анализа тройных угловых корреляций** [2], создании спектрометра $\gamma\gamma$ -совпадений и измерении $\gamma\gamma$ -корреляций усредненных, по большому числу высоковозбужденных состояний. Это дало нам метод значительной светосилы для изучения свойств низколежащих (вплоть до 2-3 МэВ) состояний ядер. Результатом этой программы явилась разработка метода угловых корреляций (для средних и тяжелых ядер) и определение спинов возбужденных состояний ядер Cu, Ga, Mn, Br, As и др. и коэффициентов смешивания по мультиполям (данные о которых в 70-е годы были явно недостаточны). Метод получил признание и применялся в других лабораториях.

Нами было доказано, что статистические условия в реакции (p, γ) при энергиях протонов около 3 МэВ для ядер рf-оболочки выполняются хорошо. Способ реализации их - потери энергии протонов в мишенях с толщиной порядка 100-200кэВ.

Второй не менее значимой работой [3] была **разработка и применение метода анализа дифференциальных сечений и угловых распределений γ -лучей** из реакции (p, γ) для конечных состояний, заселяемых ненаблюдаемыми каскадными γ -переходами. Авторами была обнаружена высокая чувствительность статистической модели к спином состояний и коэффициентам смешивания для конечных γ -переходов, что и позволило назвать такой подход новым методом ядерной спектроскопии. Далеко неординарными явились также данные, полученные о каскадности и спектрах множественности γ -излучения. Было показано, что каскадность излучения для большинства ядер насыщается 5-8 переходами, слабо растет в этих

пределах от энергии возбуждения и спинов конечных состояний. Такое поведение каскадности естественно ограничивается вероятностями мультипольных переходов, а сами данные и методика представляют значительный интерес для ядерной энергетики, где такая информация доступна лишь в очень трудоемких экспериментах.

Создание в лаборатории ядерной спектроскопии уникального парного γ -спектрометра на базе Ge-Li-детектора с высоким энергетическим разрешением и эффективностью [4] позволило наблюдать первичные γ -переходы из высоковозбужденных состояний ядер и, таким образом, поставить вопрос о **механизме реакций захвата**, изучая не только полные, но и парциальные сечения (ПС) реакции. При этом было установлено, что механизм реакции захвата на ядрах рf-оболочки носит статистический характер. Вклад валентного захвата не может быть больше нескольких процентов.

В рамках статистической теории была описана вся совокупность экспериментальных данных по захвату протонов ядрами от Ti до Se [5] без вариации параметров, кроме величины РСФ. Последняя определялась экстраполяцией сечения фотоядерных реакций в область энергий связи нуклона и ниже. Для описания сечений заселения возбужденных состояний ядер предполагалась выполненной гипотеза Бринка о возможности построения E1-резонанса на любом возбужденном состоянии. Величина РСФ варьировалась выбором константы S_{E1} , определяющей долю силы E1-резонанса, которая отщепляется в область низких энергий. Такой феноменологический подход был вынужденной мерой, так как экстраполяция Лоренциана обычно приводит к переоценке сечений в несколько раз.

Величина и энергетическая зависимость РСФ при энергиях вблизи нуклонного порога является предметом многих теоретических и экспериментальных работ в течение последних двух десятилетий. В ряде работ было показано, что формулировка E1-резонанса, основанная на лоренцевой форме и гипотезе Бринка, приводит к постоянной переоценке вычисленных полных радиационных ширин в области изолированных резонансов. В теоретических работах В.Сироткина и др. показано и уже получило подтверждение в ряде экспериментальных работ, в том числе и наших, что можно рассматривать E1-резонанс, основанный на лоренцевой форме, лишь с учетом энергетической зависимости спредовой ширины и ее температурной зависимости. Такой подход позволил описать экспериментальные данные для нескольких редкоземельных ядер и ядер рf-оболочки ($^{49,51}\text{V}$, ^{46}Ti , ^{70}Ge) [6,7]. Предсказательная сила модели хорошая, однако, в литературе имеется мало данных о РСФ в указанной выше области энергий для адаптации модели и ее дальнейшего развития. Скудная информация о РСФ ниже порога фотоядерных реакций связана с отсутствием

хороших методов ее определения. Нами был предложен и разработан модельно зависимый способ определения РСФ, опирающийся на измеренные ПС реакции (p,γ) и статистическую модель. Полученные таким образом данные сравнивались с различными теоретическими оценками, которые привели нас к следующим выводам:

– Энергетическая зависимость РСФ вблизи энергии связи нуклона в общем не согласуется с лоренцевой зависимостью;

– РСФ практически для всех ядер от Ti до Br [6,7] (изученных нами) согласуется с теоретическим подходом, предложенным Сироткиным и др., где поведение РСФ существенным образом зависит от структуры ядра. РСФ модифицируется таким образом, что появляется зависимость от температуры ядра и его структуры. РСФ не может быть записана как функция только энергии $S(E_\gamma)$, а имеет вид $S(E_\gamma, T, J^\pi)$, где T - температура ядра. Под зависимостью от J^π мы подразумеваем зависимость от структуры ядра;

- это приводит к существенно новой формулировке гипотезы Бринка, а именно, гигантский резонанс может быть построен на любом возбужденном состоянии ядра лишь с учетом его температуры, а величина РСФ в области энергии связи нуклона будут определяться спредовой шириной E1-резонанса.

Подтверждается также вывод модели о том, что E1-силовая функция имеет не нулевой предел при стремлении энергии γ -квантов к нулю.

Выводы о нетрадиционном поведении РСФ ниже E1-резонанса подтверждаются в ряде работ других авторов (Chrien R.(США) для ^{157}Gd , Попов Ю.П.(Дубна) для ^{144}Nd). Наши данные хотя и перекрывают относительно небольшой участок энергий, тем не менее позволяют сделать однозначный выбор модели для описания РСФ, а, следовательно, ее величины и энергетической зависимости в широком интервале энергий.

Литература

1. Сторишко В.Е. Программа и тезисы докладов 18 Сов. по яд. спектр. и структ. ат. ядра, Л.: Наука, 257(1968).
2. Болдышев В.Ф., Немашкало Б.А., Сторишко В.Е. ЯФ. 14, 607(1971).
3. Ехичев О.И., Кривонос Г.А., Немашкало Б.А. и др. Изв. АН СССР. Сер. физ. 41, 1722(1977).
4. Немашкало Б.А. Препринт ХФТИ, 82-14 (1982).
5. Немашкало Б.А., Шебеко К.В., Сироткин В.К. ЯФ. 55, 123(1992).
6. Залобовский И.И., Немашкало Б.А., Раткевич С.С. и др. ЯФ. 57, 777(1994).
7. Раткевич С.С., Немашкало Б.А., Федоренко И.Д. ЯФ. 60, 804(1997).
8. Сироткин В.К., Зарецкий Д.Ф. Изв. АН СССР. Сер. физ. 52, 984(1988).

Статья поступила: в редакцию 26 мая 1998 г.,
в издательство 1 июня 1998 г.