

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

3326/82

P3-82-309

В.А.Втюрин, Ю.П.Попов

ОБ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ
ГИГАНТСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ДИПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА
В ОБЛАСТЬ МАЛЫХ ЭНЕРГИЙ

1982

I. Введение

Гигантские мультипольные резонансы широко изучаются с помощью фотоядерных реакций, а в последнее время и в реакциях неупругого рассеяния быстрых частиц. Эти исследования позволяют определить положение резонанса, его полуширину, приписать ему определенную мультипольность. Форма гигантского резонанса обычно принимается лоренцевой. Такая форма неплохо описывает экспериментальные данные на расстоянии порядка одной – двух ширин от максимума резонанса.

Исследования спектров γ -лучей радиационного захвата нейтронов и протонов показывают, что энергетическая зависимость средних вероятностей γ -переходов с энергией 5 – 8 МэВ (переходы компаунд – простое состояние ($C \rightarrow S$)) неплохо описывается гигантским электрическим дипольным резонансом (ГЭДР), экстраполированным в эту область энергии по кривой Лоренца^{/1/}. При этом использовалась гипотеза Акселя-Бринка^{/2/} о том, что на любом возбужденном состоянии ядра можно построить гигантский резонанс с такими же параметрами, как и для основного состояния. Однако по абсолютным значениям экспериментальные данные в области ($C \rightarrow S$)-переходов^{/3/}, как правило, лежат ниже кривой Лоренца, а для некоторых ядер наблюдались и нерегулярности в зависимости вероятностей γ -переходов от энергии^{/3,4/}.

В связи с этим представляется интересным расширить диапазон исследуемых энергий γ -переходов до 0,2 МэВ, например путем изучения мягких γ -переходов между компаунд-состояниями ядер ($C \rightarrow C'$ -переходов). В этой области энергий могут также проявиться специфические эффекты, связанные с тем, что энергии таких γ -переходов сравнимы с температурой ядра^{/5/}.

В работе Фурмана и др.^{/6/} было показано, что из анализа спектров α -частиц в двухступенчатой реакции ($n, \gamma \alpha$) можно получить сведения о средних вероятностях γ -переходов $C \rightarrow C'$ в диапазоне энергий 0,2 – 1,6 МэВ. Исследования реакции ($n, \gamma \alpha$) на резонансных нейтронах, проводившиеся в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ^{/7,8,9/} и на тепловых нейтронах в ряде других лабораторий^{/10,11,12/}, показали, что вероятности $C \rightarrow C'$ -переходов пропорциональны E_γ^3 , то есть $C \rightarrow C'$ -переходы могут иметь мультипольность E1, M1 или быть их смесью. При этом в отличие от γ -переходов $C \rightarrow S$, где вклад

мультипольности ЕІ на порядок больше, чем вклад МІ, γ -переходы $C \rightarrow C'$ содержат существенно больший вклад мультипольности МІ, на что указывают результаты работы /6/. Неопределенность вкладов различных мультипольностей в δ -переходы $C \rightarrow C'$ не позволяла использовать результаты анализа реакции $(n, \delta \alpha)$ для количественного сравнения с другими данными. Положение изменилось, когда Анджеевскому и др. /9/ удалось определить отдельно вклады мультипольностей ЕІ и МІ в средние вероятности δ -переходов $C \rightarrow C'$ для составного ядра ^{144}Nd . Это открывает возможность сравнения экспериментальных данных о вероятностях δ -переходов мультипольности ЕІ в широком интервале энергий от 0,2 до 20 МэВ с различными вариантами теоретического описания гигантского электрического дипольного резонанса (ГЭДР).

2. Радиационные силовые функции для разных типов δ -переходов

Проведем сравнение имеющихся в настоящее время экспериментальных данных по переходам $C \rightarrow C'$, $C \rightarrow S$ и фотонейтронным сечениям для ядра ^{144}Nd в терминах радиационной силовой функции

$$S_{\delta} = \frac{\langle \delta \rangle}{D_i E_{\delta}^2 \ell_{\delta} + 1}, \quad (1)$$

где D_i - среднее расстояние между распадающимися состояниями с одинаковыми спином и четностью, ℓ_{δ} - мультипольность δ -переходов. В рамках R -матричной теории силовая функция может быть выражена через среднее сечение фотопоглощения /13/:

$$S_{\delta_0} = \frac{\langle \delta \rangle}{D_i E_{\delta}^2} = \frac{1}{(\pi \hbar c)^2 2g} \frac{\langle \sigma_{\delta} \rangle}{E_{\delta}} = \frac{8,67 \cdot 10^{-8}}{E_{\delta} [\text{МэВ}]} \overline{\sigma}_{\delta} [\text{мб}]. \quad (2)$$

Здесь числовой коэффициент получают с учетом нормировки на правило сумм /14/. Для получения S_{δ_0} мы воспользовались данными работы /15/. Величины S_{δ}^{cs} взяты из работы Рамана /17/, в которой измерялись средние интенсивности δ -переходов мультипольности ЕІ из реакции $^{143}\text{Nd}(n, \delta)^{144}\text{Nd}$ на пучке нейтронов из реактора, фильтрованных скандием ($\langle E_n \rangle = 2$ кэВ, $\Delta E_n = 0,6$ кэВ). Силовые функции для $C \rightarrow C'$ -переходов мультипольности ЕІ вычислялись по результатам измерения спектра α -частиц из реакции $^{143}\text{Nd}(n, \delta \alpha)^{140}\text{Ce}$ на тепловых нейтронах /12/, где каждая точка спектра соответствует интервалу усреднения ΔE_n порядка 50 кэВ. Методика расчета использовалась такая же, как и в работе /9/. При этом делалось предположение, что отношение радиационных силовых функций мультипольностей ЕІ и МІ для всех экспериментальных точек спектра одинаково и равно единице, как это имеет место в среднем по всему спектру /9/. То есть силовая функция, соответствующая j -той точке спектра α -частиц, связана с числом отсчетов $N_{\delta \alpha}^j$ следующим образом (подробнее см. /9/):

$$S_{\delta_j}^{cc}(E_1) = C N_{\delta \alpha}^j \frac{\sqrt{\delta}(B_n) [1 - E_{\delta}/(B_n - \delta)]^n}{\Delta E_{\alpha} D_i E_{\delta}^3 [T_{\alpha_j}^{E_1} + T_{\alpha_j}^{M_1} S_{\delta}^{cc}(M_1) / S_{\delta}^{cc}(E_1)]}, \quad (3)$$

где константа C определяется из условия, что интегральный спектр α -частиц из реакции $(n, \delta \alpha)$ дает величину $\sqrt{\delta} \alpha$. Здесь $\sqrt{\delta}(B_n)$ - полная средняя радиационная ширина нейтронного резонанса, δ - энергия спаривания, $T_{\alpha_j}^{E_1(M_1)}$ - суммарная проникаемость для вылета α -частиц из промежуточного состояния после испускания δ -кванта мультипольности ЕІ (МІ). Погрешности силовых функций $C \rightarrow C'$ -переходов обусловлены статистическими ошибками $\Delta N_{\delta \alpha}^j$, неопределенностью показателя степени n , определяющего зависимость полной радиационной ширины от энергии (значение n , полученное из различных систематик полных радиационных ширин, варьируется от 1 /18/ до 2,5 /19/). Кроме того, учитывалась погрешность относительного хода энергетической зависимости проникаемости барьера T_{α} от энергии. Эти погрешности могут повлиять на вид энергетической зависимости силовой функции и показаны на рисунках при каждой экспериментальной точке. Систематическая ошибка, общая для всех экспериментальных точек, обусловлена погрешностями нормировки ширин $\sqrt{\delta} \alpha$, $\sqrt{\delta}(B_n)$ и погрешностью экспериментального значения средней полной α -ширины $\langle \delta \alpha \rangle$ из работы /20/, на которое нормировалась проникаемость T_{α} . Эта ошибка составляет 23% в случае ^{144}Nd и не превышает 30% для остальных ядер.

Для области $1,6 < E_{\delta} < 5$ МэВ довольно грубая оценка S_{δ} может быть получена на основе экспериментальных значений полных радиационных ширин (см. работу /21/). В этом случае получается значение S_{δ} , усредненное в широкой области спектра первичных δ -лучей от 1,6 до 4 МэВ, являющееся суммой мультипольностей ЕІ и МІ. Погрешность оценки S_{δ} здесь в основном обусловлена неопределенностью зависимости плотности уровней от энергии в этом интервале.

В области энергий $E_{\delta} > 5$ МэВ погрешности обусловлены главным образом малым числом парциальных δ -ширин, по которым проводится усреднение.

Наиболее точные и многочисленные данные о силовых функциях получены на основе измерений полного сечения фотопоглощения при $E_{\delta} > B_n$ /15, 16/. Хотя полное сечение фотопоглощения является суммой сечений для всех возможных мультипольностей, в области максимума ГЭДР вкладом всех мультипольностей, кроме ЕІ, по-видимому, можно пренебречь.

При сопоставлении данных о захватных δ -лучах и данных фотоядерных реакций нельзя не упомянуть о возможных источниках некор-

ректности подобной операции. Как упоминалось, использование механизма гигантского дипольного резонанса для описания взаимодействия γ -излучения с ядром базируется на гипотезе Акселя-Бринка, где предполагается, что сечение фотопоглощения не зависит от энергии возбуждения ядра и от спина состояния, а определяется только энергией γ -кванта. В работе /22/ указывалось, что к нарушению гипотезы Акселя-Бринка (отличию силовых функций γ -распада и фотопоглощения) может приводить, в частности, отличие формы ядра в основном и возбужденном состоянии (о возможности существенного изменения среднеквадратичного радиуса ядра ^{238}U после захвата нейтрона см. /23/).

Сравнение данных реакции ($d, p \gamma$) на ^{197}Au и ^{181}Ta при разных энергиях возбуждения, проведенное в работе /4/, подтверждает независимость сечения фотопоглощения от энергии, однако спиновая независимость радиационных силовых функций еще требует своего экспериментального подтверждения.

3. Экспериментальные данные и ГЭДР

На рисунке 1 представлены полученные таким образом значения радиационных силовых функций для всех трех типов γ -переходов. Здесь же представлены и теоретические кривые, используемые обычно для описания ГЭДР.

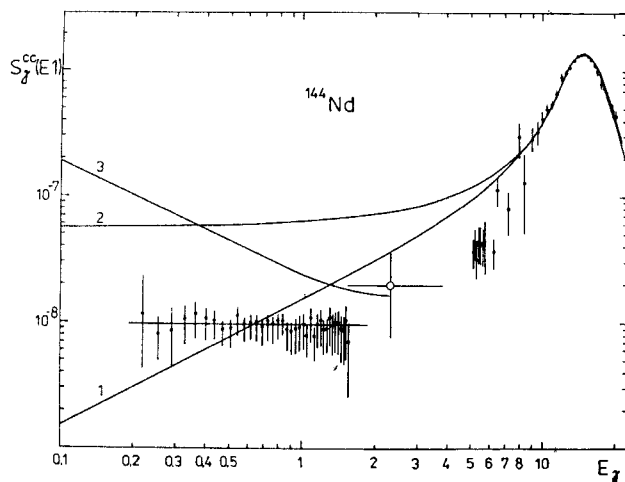


Рис. 1

Наиболее широко используется лоренцевская зависимость /1/ (кривая 1 на рис. 1)

$$\sigma(E_\gamma) = \frac{\sigma_0}{[(E_\gamma - E_g)^2 / E_g \Gamma_g]^2 + 1} \quad (4)$$

Здесь σ_0 - сечение в максимуме резонанса, а E_g и Γ_g - его положение и ширина. Иногда для этого используется брейт-вигнеровская зависимость /13/ (кривая 2 на рис.1)

$$\sigma(E_\gamma) = \frac{\sigma_0}{4(E_\gamma - E_g)^2 / \Gamma_g^2 + 1} \quad (5)$$

Использованные параметры кривых приведены в таблице I.

Таблица I

Ядро	σ_0 [мб]	E_g [МэВ]	Γ_g [МэВ]	Источник
^{124}Te	281 ± 15	$15,2 \pm 0,1$	$5,5 \pm 0,2$	/15/
^{144}Nd	317 ± 15	$15,05 \pm 0,1$	$5,3 \pm 0,25$	/16/

Другие способы аппроксимации сечения в районе максимума ГЭДР, например гауссианом, в отличие от упомянутых зависимостей, не имеют достаточного физического обоснования и носят скорее феноменологический характер.

Как можно видеть, экстраполяции зависимости типа лоренцевской, кривая (1), хорошо воспроизводит экспериментальную величину S_γ в районе 0,5 МэВ, но не дает правильной зависимости силовой функции от энергии, завышая ее в районе 7 МэВ. Экстраполяция брейт-вигнеровской зависимости, кривая (2), дает завышенное примерно в 6 раз значение S_γ , но в принципе позволяет правильно описать ее энергетическую зависимость. При этом возникает естественный вопрос, не связаны ли в данном случае трудности описания экспериментальных данных со спиновой зависимостью радиационной силовой функции? При фотопоглощении ядром-мишенью ^{144}Nd возбуждаются уровни 1^- , а при захвате нейтронов ^{143}Nd образуются компаунд-состояния со спином 3^- и 4^- , тогда, положив $S_\gamma^4 / S_\gamma^3 = 6$, удалось бы удовлетворительно описать данные по захватным γ -лучам брейт-вигнеровской зависимостью ($\chi^2 = 59$ при 51 степени свободы). Однако это не проходит в случае ^{124}Te , где может быть проведено непосредственное сопоставление данных о захватных γ -лучах и фотопоглощении, поскольку здесь Е1-переходы идут в обоих случаях через состояние 1^- . На рисунке 2 представлены верхние оценки силовых функций $S_\gamma^cc(E)$, полученные из ана-

лиза данных по $c \rightarrow c'$ -переходам в предположении чистых ЕІ-переходов, и данные по фотопоглощению ^{124}Te . Как можно видеть, данные о реакции ($n, \gamma \alpha$) лежат ниже брейт-вигнеровской зависимости, которая так же, как и в случае других ядер, дает завышенное значение S_γ в области 2 - 3 МэВ (см. рис. 2, где кружочком показана оценка суммы S_γ для мультипольностей ЕІ и МІ, полученная на основе полной радиационной ширины в работе /21/).

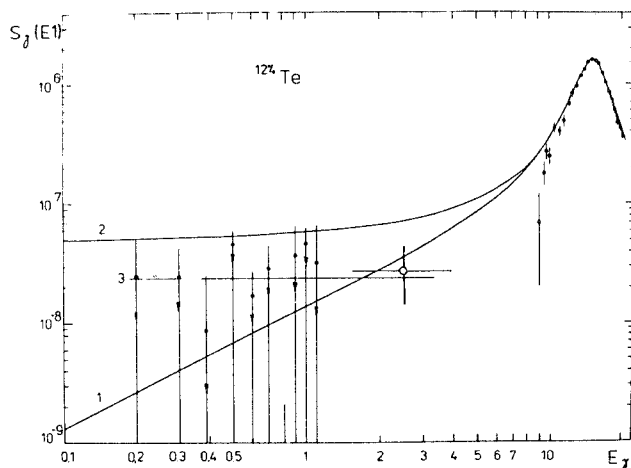


Рис. 2

Надо сказать, что превышение лоренцевской зависимостью экспериментальных точек для других ядер в области $E_\gamma < B_n$ отмечалось и ранее в работах /4, 17/. Интересно отметить, что в работе /4/, где удалось измерить S_γ для Tl до энергии $E_\gamma \approx 3$ МэВ зависимость $S_\gamma(E_\gamma)$ похожа на ту, что наблюдается в случае ^{144}Nd , то есть наблюдается более резкий спад с уменьшением E_γ и постоянство S_γ в районе 3 МэВ.

В связи с тем, что все упомянутые модели не дают правильного описания $S_\gamma(E_\gamma)$ при малых энергиях, что, в частности, не позволяет рассчитать абсолютные значения полных радиационных ширины, в последнее время были предприняты попытки анализа низкоэнергетической части ГЭДР, $E_\gamma \ll E_g$, на основе полумикроскопического (оболочечного) подхода.

В работе /24/ ширина Γ_g связывается с мнимой частью оптического потенциала, что приводит к ее зависимости от энергии. Это позволяет получить правильное значение полной радиационной ширины, но зависимость $\langle \Gamma_g^{cs} \rangle (E_\gamma)$ при этом оказывается более резкой, $\langle \Gamma_g^{cs} \rangle \approx E_\gamma^6$, что противоречит данным по $c \rightarrow c'$ -переходам. В работе /5/ была учтена зависимость Γ_g от температуры ядра в конечном состоянии. Полученная зависимость $S_\gamma(E_\gamma)$ позволяет удовлетворительно рассчитать полные радиационные ширины, но плохо согласуется с данными по $c \rightarrow c'$ -переходам (кривая 3 на рис. 1).

Интересный результат получен в недавно опубликованной работе /25/, где причина расхождения экспериментальных данных и теоретических предсказаний, основанных на лоренцевской зависимости, усматривается в том, что в работе Акселя /1/ и всех последующих работах неправильно учитывались свойства поляризационного оператора. Корректный учет свойств поляризационного оператора и зависимости Γ_g от температуры конечного состояния при $E_\gamma \ll E_g$, по мнению авторов /25/, дает существенно иную зависимость $S_\gamma(E_\gamma)$. При этом S_γ оказывается постоянной для энергии менее 2 МэВ, и при нормировке на правило суммы величина ее в этой области энергий оказывается порядка 10^{-8} МэВ^{-3} . Хорошее согласие этого результата с экспериментом показывает, что авторам /25/, по-видимому, удалось отразить новую существенную сторону механизма электрического дипольного взаимодействия γ -квантов с ядром.

В заключение работы хотелось бы подчеркнуть, что сравнение различных подходов к описанию основных свойств γ -переходов мультипольности ЕІ в широком диапазоне энергий переходов пока удалось сделать только для одного нуклида. Вероятно, отмеченные здесь особенности имеют место и для других ядер, однако это предположение требует экспериментальной проверки.

Литература

1. Axel P. Phys.Rev., 1962, 126, p.271.
2. Brink D.M. Doctoral Thesis, Oxford University, 1955.
3. Bollinger L.M. In: Nuclear Structure, IAEA, Vienna, 1968, p.317.
4. Bartholomew G.A. Adv.Nucl.Phys., 1973, 7, p.229.
5. Бондаренко В.И., Урин М.Г. ЯФ, 1982, т.35, вып.2, с. 675.
6. Furman W.I. e.a. Phys.Lett., 1973, vol.44B, No.3, p.465.
7. Втюрин В.А. и др. В кн.: Нейтронная физика, ч.4, 1976, М., ЦНИИатоминформ, с.65.

8. Во Ким Тхань и др. ОИЯИ, P3-II38I, Дубна, 1978.
9. Анджеевски Ю. и др. ОИЯИ, P3-8I-433, Дубна, 1981.
10. Kvitek J. e.a. Preprint UJF 3303-Rez, 1974.
11. Emsalleem E., Asghar M. In: Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy, RCN, Petten, Netherlands, 1975, p.395.
12. Aldea L., Seyfarth H. In: Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy, Plenum Press New York, 1979, p.526.
13. Захарова С.М., Ставинский В.С., Шубин Ю.Н. В сб.: Ядерные константы, вып. 2, ЦНИИАтоминформ, М., 1971, с.5.
14. Блатт Дж., Вайскопф В. Теоретическая ядерная физика, ИИЛ, М., 1956.
15. Lepretre A. e.a. Nucl.Phys., 1976, A258, p.230.
16. Carlos P. e.a. Nucl.Phys., 1971, A172, p.437.
17. Raman S. In: Proc. IV-the Int. Conf. on Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Subjects, Sept. 7-1, Grenoble, 1982.
18. Малэцки Х. и др. ЯФ, 1971, т.31, вып.2, с. 240.
19. Малэцки Х., Попов А.Б., Тщецяк К. ОИЯИ, P3-82-II, Дубна, 1982.
20. Анджеевски Ю. и др. ЯФ, 1980, т.32, вып. 6, с.1496.
21. Втиурин В.А. ОИЯИ, P3-82-305, Дубна, 1982.
22. Bartholomew G.A. and Khanna F.G. In: Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy, RCN, Petten, Netherlands, 1975, p.119.
23. Meister E.A. Nucl.Phys., 1981, A362, p.18.
24. Зарецкий Д.Ф., Сироткин В.К. ЯФ, 1978, т.27, вып. 6, с.1534.
25. Каменский С.Г., Маркушев В.П., Фурман В.И. ОИЯИ, P4-82-210, Дубна, 1982.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 апреля 1982 года.

Втиурин В.А., Попов Ю.П. Об экстраполяции гигантского электрического дипольного резонанса в область малых энергий P3-82-309

На основе экспериментальных спектров реакции (n, γ) и полученного ранее соотношения средних (по интервалу $0,2 < E_\gamma < 1,6$ МэВ) значений радиационных силовых функций для переходов мультипольности E1 и M1 получена энергетическая зависимость силовой функции E1-переходов в этой области энергий. Проводится сопоставление этих данных, данных по жестким γ -переходам и по фотоядерным реакциям для ядер ^{124}Te и ^{144}Nd в области энергий γ -лучей от 0,2 до 20 МэВ с различными вариантами теоретического описания формы гигантского электрического дипольного резонанса /ГЭДР/. Показано, что ни лоренцевская, ни брейт-вигнеровская форма ГЭДР не согласуется с экспериментальными данными. При $E_\gamma \ll E_g$ величина и вид зависимости силовой функции от энергии могут быть описаны при корректном учете свойств поляризационного оператора и зависимости ширины Γ_D от ядерной температуры конечного состояния.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Vtiurin V.A., Popov Yu.P. On Extrapolation Giant Dipole Resonance in Low-Energy Region P3-82-309

The energy dependence of the strength function for E1 transitions was obtained in the energy interval $0.2 < E_\gamma < 1.6$ MeV using the experimental spectra of (n, γ) reaction and the earlier derived relationship of averaged over this interval values of radiation strength functions of E1 and M1 transitions. A comparison was drawn of these data, data on hard γ -transitions and on photonuclear reaction on ^{124}Te and ^{144}Nd nuclei in the energy range from 0.2 to 20 MeV with several theoretical versions for the shape of the giant electric dipole resonance (GEDR). It was shown that neither the Lorentz nor Breit-Wagner shape of GEDR agreed with experimental data. At $E_\gamma \ll E_g$ the value and shape of the dependence of the strength function on energy can be described, provided the properties of the polarization operator and the dependence of the width Γ_D on nuclear temperature of the final state are taken into account correctly.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод авторов.