

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P4-85-159

Ф.А.Гареев, Ф.Гарсия\*, С.П.Иванова,  
Р.Кабесас\*, Г.Мико\*

НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ  
НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НЕЙТРОНОВ  
НА ЯДРЕ  $^{168}\text{Er}$

Направлено на 35 Собрание  
по ядерной спектроскопии  
и структуре атомного ядра /Ленинград/  
и в "Известия АН СССР, сер. физ."

\* Московский государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

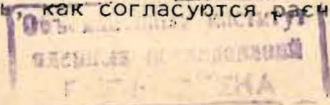
1985

Интерес к исследованиям неупругого рассеяния нейтронов с энергиями в интервале от 1 до 3 МэВ особенно увеличился в связи с появлением экспериментальных данных, не нашедших удовлетворительной интерпретации в рамках оптико-статистической модели, в которой предполагается независимость каналов реакций. Этот вопрос достаточно подробно рассматривается в ряде работ <sup>1-3/</sup>, в которых указывается, что одна из причин обнаруженных отклонений от оптико-статистической модели связана с коллективными свойствами нижних уровней ядер и деформацией оптического потенциала.

В последние годы получен ряд новых результатов, демонстрирующих возможности использования неупругого рассеяния нейтронов как источника информации о динамике ядерных взаимодействий при низких энергиях и о структуре возбужденных состояний ядер. Так, в <sup>4-6/</sup> показано, что возбуждение коллективных уровней деформированных ядер происходит в основном за счет прямого процесса уже при энергии нейтронов ~ 2,5 МэВ. В других работах <sup>7,8/</sup> делают заключение об отклонении от аксиальной симметрии некоторых ядер переходной области на основе ожидаемой чувствительности неупругого рассеяния низкоэнергетических нейтронов к неаксиальным возбуждениям, и показывают, что учет неаксиальности и гексадекапольной деформации дает существенный вклад при расчете сечений прямых процессов. Чувствительность сечения неупругого рассеяния нейтронов низких энергий к особенностям структуры ядра, не учитываемым оптической моделью и моделью составного ядра, повышает интерес к исследованиям этого процесса.

С другой стороны, наблюдаемое расхождение со статистической моделью, основанной на предположении о независимости каналов реакции, возникает как за счет вклада сечения прямой реакции, так и за счет эффектов связи каналов в сечении компаунд-процесса. В <sup>9,11/</sup> разработан последовательный теоретический подход в описании процесса через компаунд-ядро при наличии прямого процесса, обусловленного динамической связью каналов. В частности, приближение, предложенное в <sup>10/</sup>, позволяет с достаточно высокой точностью рассчитывать современные поправки к формуле Хаузера-Фешбаха.

В недавней экспериментальной работе <sup>12/</sup> представлены результаты сечений возбуждения низколежащих состояний ядра <sup>168</sup>Er при неупругом рассеянии нейтронов с энергиями от 80 кэВ до 14 МэВ. Цель настоящей работы - исследовать механизм неупругого рассеяния нейтронов на ядре <sup>168</sup>Er при возбуждении состояний  $2^+/79,8$  кэВ/,  $4^+/264$  кэВ/,  $6^+/548,7$  кэВ/ и  $8^+/928$  кэВ/ основной ротационной полосы и рассмотреть, как согласуются расчеты с эксперименталь-





ными результатами из <sup>12/</sup>, если данное ядро представляется как хорошо деформированное со следующими значениями параметров квадрупольной и гексадекапольной деформации:  $\beta_2 = 0,341$ ,  $\beta_4 = -0,034$  <sup>13/</sup>.

В общем - ядро <sup>168</sup>Er считается хорошо деформированным, спектр низколежащих состояний его детально изучен <sup>14,15/</sup>, однако в последнее время появились работы, в которых исследуется возможность существования неаксиальной деформации в основном и низколежащих состояниях этого ядра <sup>16/</sup> и возможность появления ангармоничности по отношению к  $\gamma$ -вибрациям <sup>17-18/</sup>.

### РАСЧЕТЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ

Сначала рассчитаем интегральные сечения, отвечающие прямым процессам, с помощью традиционного метода связанных каналов <sup>19-20/</sup>. Оптический потенциал выбран в обычной форме:

$$V(r, \theta, \phi) = - \frac{V}{1 + \exp \frac{r-R}{a}} + 4iW_d a' \frac{d}{dr} \frac{1}{1 + \exp \frac{r-R}{a'}} +$$

$$+ V_{s.o.} \left( \frac{\hbar^2}{M_n C} \right) (\vec{\sigma} \cdot \vec{\ell}) \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \frac{1}{1 + \exp \frac{r-R}{a}}$$

где  $R = R_0(1 + \beta_2 Y_{20} + \beta_4 Y_{40})$ .

Были взяты следующие параметры оптического потенциала:

$V = 51,73 - 0,32E$ МэВ	$R_0 = 1,25 A^{1/3}$ ф
$W_d = 1,5 + 0,4 E$ МэВ	$a = 0,65$ ф
$V_{s.o.} = 8,5$ МэВ	$a' = 0,58$ ф.

С целью проверки выбора параметров оптического потенциала проведено сравнение расчета дифференциального упругого сечения при энергии 1,45 МэВ с экспериментальными данными для Er, взятыми из работы <sup>19/</sup>. Расчеты проведены как по программе Jupiter <sup>20,21/</sup>, так и по программе ECIS <sup>22/</sup>. Как видно из рис.1, получается удовлетворительное согласие с экспериментом.

Расчеты вклада прямых процессов в интегральные сечения возбужденных состояний проводились с помощью программы Jupiter со схемами связи от двух состояний  $0^+ - 2^+$  до пяти  $0^+ - 2^+ - 4^+ - 6^+ - 8^+$  в зависимости от энергии налетающих нейтронов. Для упрощения расчетов при энергиях  $E_n > 7$  МэВ использовано адиабатическое приближение, так как при таких энергиях процесс столкновения идет гораздо быстрее, чем характерное внутриядерное движение.

На рис.2 и 3 показаны кривые зависимости интегральных сечений возбуждения от энергии налетающих нейтронов. Пунктирной ли-

Рис.1. Сечение упругого рассеяния нейтронов с  $E_n = 1,45$  МэВ на ядре <sup>168</sup>Er.

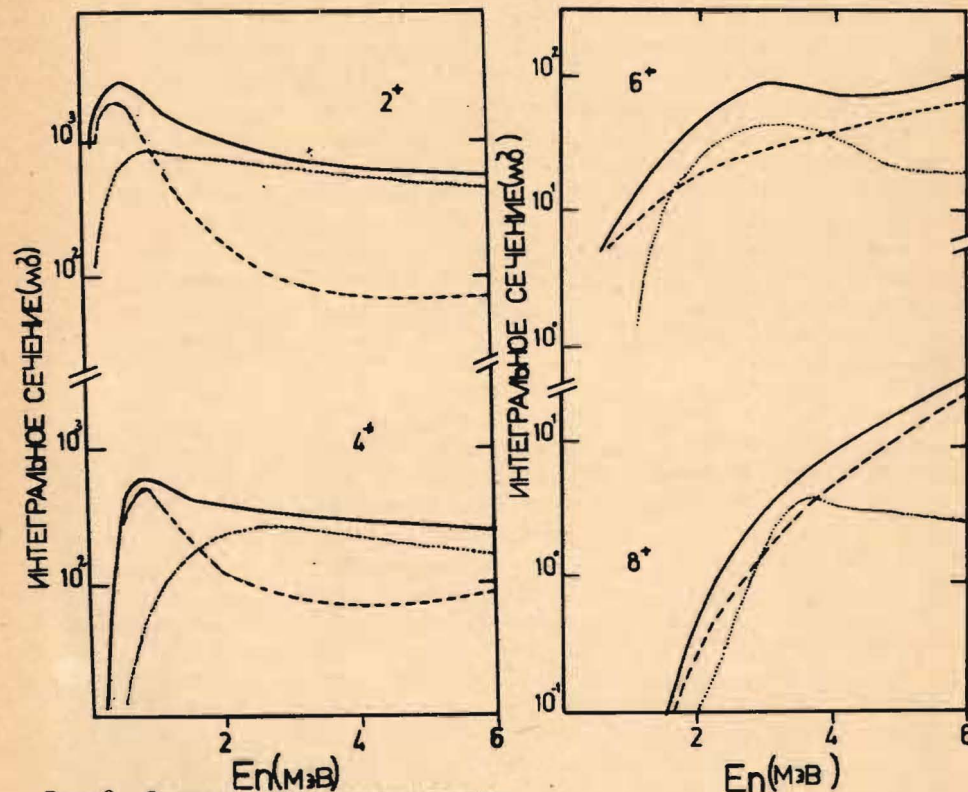
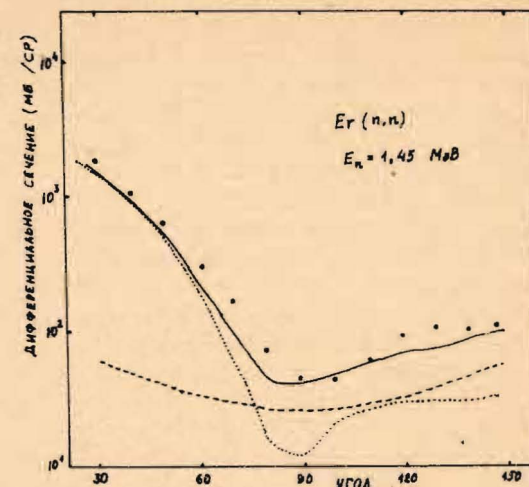


Рис.2. Зависимость интегрального сечения возбуждения от энергии налетающего нейтрона для состояний  $2^+$  и  $4^+$ .

Рис.3. То же, что и на рис.2, но для состояний  $6^+$  и  $8^+$ .



нией обозначено сечение прямого процесса; штриховой - сечение составного ядра, сплошной линией - полное сечение. Из рис.2 видно, что уже при энергии нейтронов  $\geq 1$  МэВ вклад прямого процесса в сечение первого возбужденного состояния  $2^+$  существен и сравним с вкладом составного процесса. При  $E > 1$  МэВ по мере увеличения энергии сечение составного процесса быстро уменьшается на порядок, и прямой механизм оказывается преобладающим. Подобная картина наблюдается в сечении возбуждения состояния  $4^+$ , где сечение составного процесса также достигает максимума вблизи 1 МэВ, а затем быстро спадает, и уже при  $E \sim 2$  МэВ сравнимо с сечением прямого процесса, которое в конечном счете преобладает при дальнейшем росте энергии до  $E \sim 8$  МэВ. Иная ситуация наблюдается в сечениях возбуждения состояний  $6^+$  и  $8^+$  /см. рис.3/.

Для состояния  $6^+$  составной процесс преобладает практически во всем рассматриваемом интервале энергии кроме узкого интервала  $E \sim 2-4$  МэВ, где прямой процесс превышает составной; для состояния  $8^+$  этот интервал становится еще уже, и при энергиях  $E > 4$  МэВ вклад прямого механизма по сравнению с составным невелик.

Вклад процесса, идущего через составное ядро, рассчитывался с помощью формулы Хаузера-Фешбаха с поправкой Молдауэра на флуктуацию ширин с помощью программы LIANA<sup>/23/</sup>. В расчетах было учтено до 75 возбужденных состояний ядра  $^{168}\text{Er}$ , обсуждавшихся в недавней работе Давидсона и др.<sup>/13/</sup>.

Окончательные результаты интегральных полных сечений возбуждения для каждого состояния получены путем интегрирования по энергии в интервале от 0,08 до 14 МэВ. Значения этих сечений представлены в таблице, где отдельно даны вклады прямого и компаунд-сечений.

Таблица

Сравнение интегральных полных сечений, рассчитанных в этой работе, с экспериментальными значениями

$I^\pi$	$\sigma_{\text{хф}} + \sigma_{\text{пр}} = \sigma_{\text{п}} / \text{мб/}$	$\sigma_{\text{экср}} / \text{мб/}$
$2^+$	$698 + 627 = 1325$	$1900 \pm 1000$
$4^+$	$190 + 129 = 319$	380
$6^+$	$16 + 11 = 27$	32
$8^+$	$2,9 + 0,7 = 3,6$	4

Из таблицы видно, что вклады компаунд-реакции и прямого процесса в сечения возбуждения сравнимы по величине, и их сумма довольно хорошо согласуется с экспериментальными сечениями.

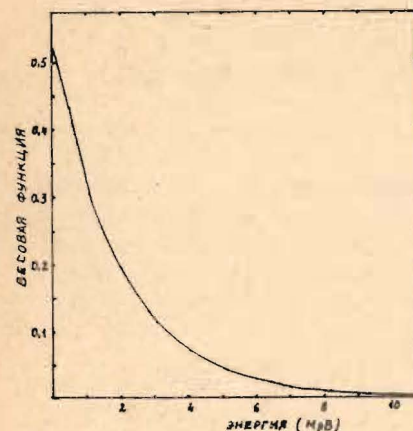


Рис.4. Весовая функция для потока нейтронов /12/

Надо заметить, что прямой механизм преобладает практически во всем энергетическом интервале для состояний  $2^+$  и  $4^+$ , начиная с энергии 1 МэВ. Однако самый большой вклад в интегральное сечение вносят нейтроны, энергии которых лежат в интервале от 0,08 до 1 МэВ, где преобладает компаунд-механизм /см. рис.4/. Поэтому вклад прямого процесса даже для данных состояний несколько меньше, чем вклад компаунд-процесса.

В нашей модели рассчитываются только сечения возбуждений состояний основной ротационной полосы, в то время как в энергетическом спектре ядра  $^{168}\text{Er}$  есть состояния, принадлежащие  $\gamma$ -вибрационной полосе:  $2^+ / 821$  кэВ/ и  $3^+ / 896$  кэВ/. Энергии возбуждения их лежат ниже энергии возбуждения состояния  $8^+ / 928$  кэВ/ и, таким образом, их учет и учет более высоких по энергии состояний может дать дополнительный вклад в сечения соответствующих состояний ротационной полосы. Вот почему представляет интерес для последующих исследований использовать модель, которая учитывала бы более точно возможную мягкость по отношению к  $\gamma$ -вибрациям /17-18/.

В заключение можно сказать следующее:

Результаты расчетов не только подтверждают утверждение других работ о существовании роли прямого механизма при неупругом рассеянии низкоэнергетических нейтронов на некоторых ядрах. Прямой механизм преобладает для энергий  $E \sim 3$  МэВ для всех состояний, поэтому можно сказать, что этот район энергий является наиболее чувствительным к процессу прямого возбуждения.

Авторы благодарны Е.Г.Григорьеву за полезные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Конобеевский Е.С. и др. ЭЧАЯ, 1982, 13, с.300.
2. Бычков В.М. и др. ЭЧАЯ, 1983, 14, с.373.
3. Иванова С.П., Цейпек Я. ЯФ, 1979, 30, с.1270.
4. Сооре D.F. et al. Phys.Rev., C, 1977, 16, p.2223.
5. Ситько С.П., Андреев Е.А., Басенко В.К. ЯФ, 1977, 25, с.1119.



6. Fergusson A.T.G. et al. In: Proc.Int.Conf. on Interactions of Neutrons with Nuclei. Lowell ERDA, 1976, vol.1, p.171.
7. Фернандес Х.Р., Кабесас Р., Лопес Р. ОИЯИ, Р4-84-354, Дубна, 1984.
8. Fernandez J.R., Cabezas R. J.Phys.G: Nucl.Phys., 1983, 9, p.1115.
9. Tepe J.W. et al. Phys.Lett., 1974, 49B, p.1.
10. Hofmann H.M. et al. Ann.Phys., 1975, 90, p.403.
11. Moldaver P.A. Phys.Rev. C, 1975, 11, p.426.
12. Григорьев Е.Г., Бондаренко В.А. Тезисы XXXIV совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Алма-Ата, 1984. "Наука", Л., 1984, с.132.
13. Lee I.Y. et al. Phys.Rev., C, 1975, 12, p.1483.
14. Davidson W.F. et al. J.Phys.G: Nucl.Phys., 1981, 7, p.455.
15. Бондаренко В.А. и др. Изв.АН СССР, сер.физ., 1982, 46, с.2080.
16. Cwiok S. et al. JINR, E4-83-647, Dubna, 1983.
17. Bohr A., Mottelson B.R. Phys.Scr., 1982, 25, p.28.
18. Dumitrescu T.S., Hamamoto I. Nucl.Phys.A, 1982, 383, p.205.
19. Tanaka S. et al. Nucl.Phys.A, 1972, 179, p.513.
20. Tamura T. ORNL-4152, 1967.
21. Tamura T. Rev.Mod.Phys., 1965, 37, p.679.
22. Raynal J. NEA 0850/01, 1979.
23. Smith W.R. Comp.Phys.Comm., 1969, 1, p.181.

СООБЩЕНИЯ, КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ, ПРЕПРИНТЫ И СБОРНИКИ ТРУДОВ КОНФЕРЕНЦИЙ, ИЗДАВАЕМЫЕ ОБЪЕДИНЕННЫМ ИНСТИТУТОМ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ЯВЛЯЮТСЯ ОФИЦИАЛЬНЫМИ ПУБЛИКАЦИЯМИ.

Ссылки на СООБЩЕНИЯ и ПРЕПРИНТЫ ОИЯИ должны содержать следующие элементы:

- фамилии и инициалы авторов,
- сокращенное название Института /ОИЯИ/ и индекс публикации,
- место издания /Дубна/,
- год издания,
- номер страницы /при необходимости/.

Пример:

1. *Первушин В.Н. и др. ОИЯИ, Р2-84-649, Дубна, 1984.*

Ссылки на конкретную СТАТЬЮ, помещенную в сборнике, должны содержать:

- фамилии и инициалы авторов,
- заглавие сборника, перед которым приводятся сокращенные слова: "В кн."
- сокращенное название Института /ОИЯИ/ и индекс издания,
- место издания /Дубна/,
- год издания,
- номер страницы.

Пример:

*Колпаков И.Ф. В кн. XI Международный симпозиум по ядерной электронике, ОИЯИ, Д13-84-53, Дубна, 1984, с.26.*

*Савин И.А., Смирнов Г.И. В сб. "Краткие сообщения ОИЯИ", № 2-84, Дубна, 1984, с.3.*