

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

720, 83

7/2-83

P4-82-766

С.И.Иванова, Ю.Н.Шубин

ОБОЛОЧЕЧНЫЕ ЭФФЕКТЫ
И АНОМАЛЬНЫЙ ВЫХОД α -ЧАСТИЦ
В РЕАКЦИЯХ С НУКЛОНАМИ

Направлено в журнал "Ядерная физика"

1982

Появление новых экспериментальных данных при исследовании ядерных реакций с участием тяжелых ионов стимулировало создание и развитие различных моделей, охватывающих те или иные стороны явления и опирающихся на предположение о существовании различных механизмов протекания ядерного процесса. Описание всего явления в целом требует корректной оценки вклада каждого механизма, в том числе и традиционных механизмов протекания ядерных реакций - прямых и идущих через составное ядро.

Статистический подход успешно применяется для оценки сечений и спектров вылетающих частиц в ядерных реакциях при низких и средних энергиях, поскольку вклад равновесного механизма во многих случаях оказывается подавляющим. Существуют различные варианты статистического подхода, использующие те или иные упрощения, связанные, например, с приближенным учетом углового момента и структуры ядер ^{1/}.

Расширение областей практического использования ядерных данных, в частности, для исследования возможностей электроядерного метода получения энергии ^{2/}, приводит к необходимости их надежной оценки для более широкого круга ядер и больших энергий. В связи с этим возникает задача изучения роли структуры ядер при переходе к более высоким энергиям возбуждения, ее влияния на основные характеристики процессов, такие, как спектры частиц и гамма-квантов, выходы различных изотопов ядер - продуктов реакции.

В данной работе анализируются результаты расчетов спектров и сечений реакций с выходом нуклонов, альфа-частиц и гамма-квантов, проведенных на основе статистической теории ядерных реакций, при взаимодействии протонов и нейтронов с энергиями от 10 до 50 МэВ с ядрами ²⁰⁸Pb.

Показано, что использование в расчетах систематик данных по плотности уровней ядер, построенных на основе плотности нейтронных резонансов и других низкоэнергетических данных, приводит к аномально большому выходу альфа-частиц при энергии налетающих нуклонов 40-50 МэВ. Такой эффект обусловлен наличием оболочечной структуры, которая в модели ферми-газа сохраняется при сколь угодно больших энергиях.

Определяющую роль во всех практических приложениях статистической теории ядерных реакций играет плотность состояний возбужденных ядер, для описания которой наиболее широкое распространение получила модель ферми-газа, сформулированная Бете ^{3/}. Существенной характеристикой этой модели является параметр a , связанный с плотностью одночастичных состояний вблизи поверхно-

сти Ферми. В дальнейшем для учета корреляционных эффектов и различия плотности состояний четных и нечетных ядер был введен феноменологический параметр δ , определяющий эффективную энергию возбуждения.

На основе такой модели получены систематики параметров модели a и δ , описывающие экспериментально наблюдаемые значения плотности ядерных состояний^{/4-6/}. Общей чертой всех этих систематик было наличие оболочечных провалов в области массовых чисел, близких к магическим. В таком виде модель ферми-газа применяется для описания различных ядерных реакций в широком интервале энергий и в настоящее время.

Использование микроскопических методов, развитых для описания основных и низколежащих состояний, позволило провести последовательные вычисления плотности ядерных уровней, учитывающие оболочечную структуру одночастичного спектра и парные корреляции сверхпроводящего типа^{/7-9/}. Такой подход позволил лучше понять ограничения модели ферми-газа, объяснить целый ряд отклонений от ее предсказаний, в частности, особенности энергетической зависимости плотности уровней околомагических ядер и ослабление влияния оболочечной структуры с ростом энергии возбуждения. Этот результат приводит к важным практическим выводам, поскольку, как будет показано ниже, сечения выходов частиц в реакциях с возбуждением ядер до 40-50 МэВ сильно зависят от соотношения между параметрами плотности уровней в конкурирующих каналах.

На основе статистической теории ядерных реакций были проведены расчеты спектров нуклонов, альфа-частиц и гамма-квантов при взаимодействии нейтронов и протонов с энергией 10-50 МэВ с ядрами ^{208}Pb . Метод расчета достаточно подробно описан в работе^{/10/}. На рис. 1 даны результаты расчетов интегральных выходов нейтронов и альфа-частиц в реакции $^{208}\text{Pb}(n, xn)$ и $^{208}\text{Pb}(n, \alpha xn)$ на первом этапе испарительного каскада. Параметры плотности уровней были выбраны на основе систематики^{/4/}. Обращает на себя внимание сильная энергетическая зависимость выхода альфа-частиц от энергии налетающего нейтрона, которая приводит к тому, что в области $E = 30$ МэВ выходы нейтронов и альфа-частиц выравниваются /кривые с цифрой 1/, а с дальнейшим ростом энергии выход альфа-частиц превышает выход нейтронов. Такой результат обусловлен сильным различием параметров плотности уровней остаточных ядер в нейтронном и альфа-частичном каналах. При энергиях ниже кулоновского барьера выход альфа-частиц сильно подавлен, однако при дальнейшем увеличении энергии различие экспоненциальных факторов в плотности уровней приводит к сильному превышению плотности уровней остаточного ядра ^{205}Hg по сравнению с плотностью уровней ^{208}Pb .

На рис. 2 представлены параметры плотности уровней a' и a'' , определенные в работе^{/11/} и рассчитанные на основе одночастичной схемы модели оболочек с использованием соотношений для системы невзаимодействующих ферми-частиц^{/7/}. Параметры a' и a'' являются

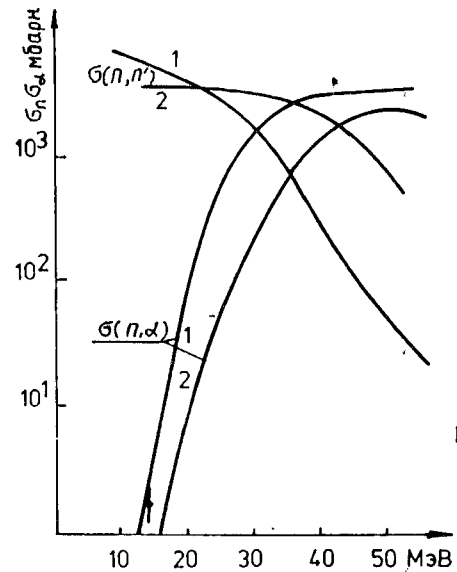
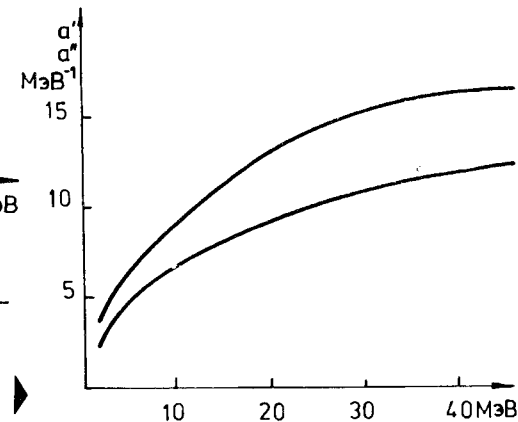


Рис. 2. Энергетическая зависимость параметров плотности уровней $a' = S^2/4U$ и $a'' = S/2t/11$ из расчетов по одночастичной схеме модели оболочек.

Рис. 1. Интегральные выходы нейтронов и альфа-частиц в реакциях $^{208}\text{Pb}(n, xn)$ и $^{208}\text{Pb}(n, \alpha xn)$ на первом этапе испарительного каскада в зависимости от энергии падающих нейтронов для двух наборов параметров плотности уровней в нейтронном и альфа-частичном канале. Кривая 1 - $a_n = 10,0 \text{ МэВ}^{-1}$, $a_\alpha = 15,0 \text{ МэВ}^{-1}$, кривая 2 - $a_n = 11,0 \text{ МэВ}^{-1}$, $a_\alpha = 15,0 \text{ МэВ}^{-1}$.



аналогом параметра a модели ферми-газа. Их энергетическая зависимость и различие между собой, обусловленные оболочечной структурой одночастичного спектра, становятся менее заметными при энергиях возбуждения 40-50 МэВ.

В таблице приведены интегральные выходы нейтронов, протонов, гамма-квантов и альфа-частиц в реакции $^{208}\text{Pb}(n, \alpha xn)$ при $E_{\text{но}} = 50$ МэВ на всех этапах испарительного каскада. В первой колонке указаны номера шага испарительного каскада, во второй обозначены величины a и δ плотности уровней модели, которые приведены в 3-6 колонках для всех конкурирующих каналов, а также интегральные сечения в этих каналах распада. Видно, что на первом шаге выход альфа-частиц больше выхода нейтронов почти на два порядка. В дальнейшем картина резко меняется, так что нейтронный канал распада является определяющим вплоть до последних двух этапов, где конкуренция радиационного канала становится более сильной. На последнем, шестом шаге, несмотря на возможность вылета частиц, выход гамма-квантов на два порядка превышает выход нейтронов из-за сильного запрета по угловому моменту.

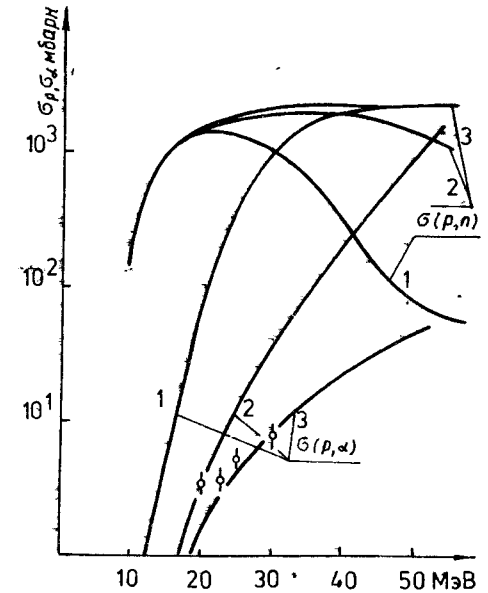
Таблица

Интегральные выходы нейтронов, протонов, гамма-квантов и альфа-частиц в реакции $^{208}\text{Pb}(n, \alpha xn)$ при $E_{\text{но}} = 50$ МэВ на всех этапах испарительного каскада

№ шага	Канал распада			
	n	p	γ	α
a (МэВ $^{-1}$)	10,0	11,5	10,1	15,0
I, δ (МэВ)	1,8	-0,8	0,4	-0,5
b (мбарн)	$4,63 \cdot 10^1$	2,78	$2,63 \cdot 10^{-3}$	$2,896 \cdot 10^3$
a (МэВ $^{-1}$)	16,00	16,00	15,00	18,00
$2, \delta$ (МэВ)	0,8	0,1	-0,5	0,5
b (мбарн)	$2,892 \cdot 10^3$	$4,136 \cdot 10^{-1}$	$9,38 \cdot 10^{-1}$	1,95
a (МэВ $^{-1}$)	16,0	16,5	16,0	18,0
$3, \delta$ (МэВ)	0,4	0,4	0,8	1,0
b (мбарн)	$2,89 \cdot 10^3$	$1,18 \cdot 10^{-1}$	1,15	$7,8 \cdot 10^{-1}$
a (МэВ $^{-1}$)	16,3	17,0	16,0	17,4
$4, \delta$ (МэВ)	0,83	0,001	0,4	0,5
b (мбарн)	$2,869 \cdot 10^3$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^1$	$7,45 \cdot 10^{-3}$
a (МэВ $^{-1}$)	14,5	17,0	16,13	18,0
$5, \delta$ (МэВ)	-0,6	0,5	0,83	0,5
b (мбарн)	$1,868 \cdot 10^3$	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^3$	$3,94 \cdot 10^{-4}$
a (МэВ $^{-1}$)	16,32	17,7	14,5	17,7
δ (МэВ)	0,55	-0,8	-0,6	0,001
\tilde{b} (мбарн)	$1,36 \cdot 10^1$	-	$1,85 \cdot 10^2$	-

Однако из результатов, показанных на рис.2, следует, что с ростом энергии E_n параметры плотности уровней в нейтронном и протонном каналах должны расти. В связи с этим может измениться соотношение между сечениями в конкурирующих каналах. На рис.1 приведены также результаты расчетов сечений /кривые с цифрой 2/

Рис.3. Интегральные выходы нейтронов и альфа-частиц в реакциях $^{208}\text{Pb}(p, xn)$ и $^{208}\text{Pb}(p, \alpha xn)$ на первом этапе испарительного каскада в зависимости от энергии налетающих протонов для различных наборов параметров плотности уровней в конкурирующих каналах. Кривая 1 - $a_n = 11,0$ МэВ $^{-1}$, $a_\alpha = 15,0$ МэВ $^{-1}$; 2 - $a_n = 13,0$ МэВ $^{-1}$, $a_\alpha = 15,0$ МэВ $^{-1}$; 3 - $a_n = a_\alpha = 15,0$ МэВ $^{-1}$. Кружками показаны экспериментальные данные с ошибками, полученные в реакции (p, α) работы /16/.



в нейтронном и альфа-частичном каналах с несколько иным соотношением параметров плотности уровней, чем указанные в таблице: $a_n = 11,0$; $a_\alpha = 15,0$. Видно, что результаты расчетов заметно изменились: теперь сечения выходов в нейтронном и альфа-частичном каналах сравниваются лишь при энергии $E_p \sim 42-43$ МэВ. Имеющееся экспериментальное значение сечения реакции (n, α) на ядре ^{208}Pb при энергии 14,5 МэВ соответствует результатам расчетов с параметрами, указанными в таблице. Из-за отсутствия интенсивных источников нейтронов экспериментальные данные для более высоких энергий, к сожалению, отсутствуют.

Аналогичные расчеты были проведены для реакции $^{208}\text{Pb}(p, xn)$ и $^{208}\text{Pb}(p, \alpha xn)$. На рис.3 показаны сечения реакций (p, n) и (p, α) в интервале энергий протонов от 10 до 50 МэВ для различных значений параметров плотности уровней в нейтронном канале: 1 - $a_n = 11,0$ МэВ $^{-1}$, $a_\alpha = 15,0$ МэВ $^{-1}$; 2 - $a_n = 13,0$ МэВ $^{-1}$, $a_\alpha = 15,0$ МэВ $^{-1}$ / и 3 - $a_n = a_\alpha = 15,0$ МэВ $^{-1}$ /. Видно, что как и в случае реакции (n, α) , сечение реакции (p, α) сильно зависит от энергии E_p , особенно при параметрах плотности уровней $a_n = 11,0$ МэВ $^{-1}$, $a_\alpha = 15,0$ МэВ $^{-1}$, и при энергиях выше 30 МэВ сечение реакции (p, α) превышает сечение реакции (p, n) . С ростом параметра плотности уровней в нейтронном канале соотношение между выходами нейтронов и альфа-частиц меняется, а в случае, когда параметры в нейтронном и альфа-частичном каналах выравниваются /кривая 3/, сечение реакции (p, n) всегда много больше сечения реакции (p, α) .

В соответствии с результатами, показанными на рис.2, сечение реакции (p, α) должно расти с энергией гораздо слабее по сравнению с оценками при фиксированном, не зависящем от энергии, параметре плотности уровней, так что следует ожидать перехода с кривой 1 на кривую 2 и дальше на кривую 3, когда энергия возбуждения будет более 30 МэВ.

На рис.3 представлены также экспериментальные данные по сечениям реакции (p, α) при энергии налетающих протонов от 20 до 30 МэВ¹⁶. Видно, что при энергии 20 МэВ экспериментальное значение сечения реакции (p, α) соответствует результатам расчетов с параметрами плотности уровней в нейтронном и альфа-частичном каналах 13,0 и 15,0 МэВ⁻¹ соответственно /кривая 2/. При переходе к более высоким энергиям сечение реакции (p, α) плавно возрастает, и при энергии 25-30 МэВ согласуется с результатами расчетов для параметров плотности уровней в нейтронном и альфа-частичном каналах $a_n = a_\alpha = 15$ МэВ⁻¹. Таким образом, использование модели ферми-газа для оценки сечений и спектров частиц в реакциях в широком интервале энергий может привести к ошибочным результатам, особенно для ядер, близких к магическим. Причиной этого является сохранение оболочечной структуры в модели ферми-газа при сколь угодно больших энергиях возбуждения.

Ранее предпринимались попытки обнаружить энергетическую зависимость параметра плотности уровней a по форме спектров неупруго рассеянных нейтронов. Однако убедительного доказательства получено не было, по-видимому, из-за сравнительно узкого интервала энергий, на котором изучались различные функциональные зависимости плотности уровней^{6,9}. В настоящей работе показано, что средством энергетической зависимости параметров плотности уровней является кардинальное различие сечений в конкурирующих каналах /нейтронном и альфа-частичном/ при высоких энергиях возбуждения.

На ослабление оболочечных эффектов с ростом энергии возбуждения указывают также результаты других работ^{13,14}, в которых изучалась зависимость равновесных деформаций и угловой анизотропии осколков деления от энергии возбуждения. На некоторое влияние оболочечной структуры при энергиях около 50 МэВ указывают результаты работы¹⁵, где изучалась реакция (α, α') на тяжелых ядрах и отмечено заметное понижение сечения при переходе от Та и Ац к Рб. В связи с этим относительная величина экспериментальных значений сечений вылета нейтронов и альфа-частиц может служить мерой того, насколько оболочечная структура, соответствующая данным при энергиях порядка энергии связи нейтрона, сохраняется при больших энергиях возбуждения.

Авторы признательны Ю.П.Попову и П.П.Дмитриеву за полезные обсуждения и интерес к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ericson T. Adv.in'Phys., 1960, 9, No.25, p.425.
2. Schriber St.O. Electronuclear Fuel Production Using High Intensity Accelerators. Atomkernenergie, 1978, 32, No.1, p.49-50.
3. Bethe H. Rev.Mod.Phys., 1937, 9, p.69.
4. Dilg W., Schantl W., Vonach H. Nucl'Phys., 1973, A217, p.269.
5. Baba H. Nucl.Phys., 1970, A159, p.625.
6. Малышев А.В. Плотность уровней и структура атомных ядер. Атомиздат, М., 1969.
7. Игнатюк А.В., Шубин Ю.Н. ЯФ, 1968, 8, с.1135.
8. Игнатюк А.В., Ставинский В.С., Шубин Ю.Н. ЯФ, 1970, 11, с.1012.
9. Maruyama M. Nucl.Phys., 1969, A131, p.145.
10. Иванова С.П., Шубин Ю.Н. ЯФ, 1982, 35, с.318.
11. Игнатюк А.В., Ставинский В.С., Шубин Ю.Н. Nuclear Data for Reactors, IAEA, Vienna, 1970, vol.2, p.885.
12. Бычков В.М., Манохин В.Н., Пащенко А.Б. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы, 1979, вып.2/33/, с.51.
13. Moretto L.G., Stella R. Phys.Rev.Lett., 1970, 32, No.7, p.558.
14. Ramamurthy V.S., Kapoor S.S., Kataria S.K. Phys.Rev.Lett., 1970, 25, p.386.
15. Chenevert G. et al. Nucl.Phys., 1968, A122, p.481.
16. Milazzo-Colli L., Braga-Harcassan G.M., Milazzo M. Nuovo Cim., 1975, 30A, p.632.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 ноября 1982 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОЎ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D13-11182	Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977.	5 р. 00 к.
D17-11490	Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.
D6-11574	Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978.	2 р. 50 к.
D3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
D13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
D1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
D1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
D11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
D4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
D4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
D2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
D10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
D1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
D1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Иванова С.П., Шубин Ю.Н. Р4-82-766
Оболочечные эффекты и аномальный выход α -частиц в реакциях с нуклонами

Обсуждаются результаты расчетов спектров и сечений реакций с выходом нуклонов, альфа-частиц и гамма-квантов, проведенных на основе статистической теории ядерных реакций, при взаимодействии нуклонов с энергией до 50 МэВ с ядрами ^{208}Pb . Показано, что использование для плотности уровней модели ферми-газа и систематики, построенной на основе данных по плотности нейтронных резонансов, приводит к аномально большому выходу альфа-частиц на первом этапе испарительного каскада, если энергия налетающих нуклонов превышает 30 МэВ. Учет затухания оболочечных эффектов, приводящего к выравниванию параметров плотности уровней в конкурирующих каналах с ростом энергии, сильно уменьшает выход альфа-частиц по сравнению с нейтронным. Поэтому относительная величина сечений с вылетом нейтронов и альфа-частиц может служить мерой того, насколько оболочечная структура сохраняется при больших энергиях возбуждения. Сравнение с экспериментом подтверждает сделанные в работе выводы о затухании оболочечных эффектов при больших энергиях возбуждения.

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Ivanova S.P., Shubin Yu.N. R4-82-766
Shell Effects and α -Particle Anomalous Yield in Reactions with Nucleons

The results of the spectra and cross section calculations for nucleons, alpha-particle and gamma-emission are discussed. The calculations were performed in the framework of the statistical theory of nuclear reactions for the nucleons interacting with ^{208}Pb nuclei at energies up to 50 MeV. It is shown that the use for the level density of Fermi's gas model and of systematics based on the neutron resonance density data results in an anomalously big alpha-yield at the first evaporation step if the incident nucleon energy exceeds 30 MeV. The shell effects damping leads to the decrease in difference between level density in competing channels. That strongly diminishes alpha-particle yield as compared to neutron one. Therefore the relative value of neutron and alpha-particle emission cross sections could indicate to what extent the shell structure is important at high excitation energies. The comparison with experiment confirms the conclusions concerning the shell effects damping at high excitation energies.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.