

С 343 е1

T-19

1556/2-77

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА

25/1-77



P7 - 10343

Н.И.Тарантин

ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ
ОТНОСИТЕЛЬНО ХОЛОДНЫХ КОМПАУНД-ЯДЕР
С ВЫСОКИМ УГЛОВЫМ МОМЕНТОМ.

Часть II. Анализ закономерностей возбуждения
компаунд-ядер

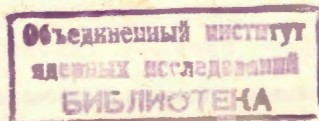
1976

P7 - 10343

Н.И.Тарантин

ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ
ОТНОСИТЕЛЬНО ХОЛОДНЫХ КОМПАУНД-ЯДЕР
С ВЫСОКИМ УГЛОВЫМ МОМЕНТОМ.

Часть II. Анализ закономерностей возбуждения
компаунд-ядер



Тарантин Н.И.

P7 - 10343

Возможности получения относительно холодных компаунд-ядер с высоким угловым моментом.
Часть II. Анализ закономерностей возбуждения компаунд-ядер

На основе простой классической модели слияния двух ядер проведен анализ возможностей получения в ядерных реакциях под действием тяжелых ионов относительно холодных компаунд-ядер с высоким угловым моментом. Показано, что возможно образование компаунд-ядер с критическим угловым моментом, определяемым входным каналом реакции слияния, и с тепловой энергией, меньшей величины $V_1 + Q$, где V_1 - барьер взаимодействия, Q - энергия, выделяемая при образовании компаунд-ядра.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований
Дубна 1976

Tarantin N.I.

P7 - 10343

The Possibilities of Production of Relatively Cold Compound-Nuclei with High Angular Momentum. II. The Analysis of the Laws of the Compound -Nucleus Excitation

On the basis of a simple classical model of fusion of two nuclei, there were analysed the possibilities of production, in the heavy ion reactions, of relatively cold compound-nuclei with high angular momentum. The possibility is shown to produce the compound-nuclei with critical angular momentum, which is determined by the entrance reaction channel, and with the thermal energy lower than $V_1 + Q$, where V_1 - is the interaction barrier, Q - is the energy realized in the compound-nucleus formation.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research
Dubna 1976

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе /1/ было проведено рассмотрение процесса слияния двух ядер на основе простой классической модели /2/, в которой в качестве критерия образования компаунд-ядра используются соотношения между ядерной, кулоновской и вращательной энергиями. Были получены формулы, определяющие наименьшую энергию возбуждения и наибольшую энергию вращения компаунд-ядра при заданной энергии бомбардирующих частиц; приведено выражение для критического углового момента, ограниченного входным каналом слияния двух сталкивающихся ядер.

В настоящей статье, являющейся продолжением работы /1/, это рассмотрение используется для анализа возможностей получения холодных компаунд-ядер с высоким угловым моментом. Такие ядра, как отмечалось в работе /1/, представляют интерес для поисков и исследований высокоспиновых изомеров, "фазовых" переходов в быстро вращающихся ядрах, реакций радиационного захвата тяжелого иона.

2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ КОМПАУНД-ЯДЕР

Зависимости наименьшей тепловой энергии компаунд-ядра E_{rot}^* и соответствующей ей наибольшей энергии вращения $E_{rot}^{th III}$ от кинетической энергии бомбар-

*Здесь и ниже используются те же символы для обозначения физических величин, что и в работе /1/.

дирующих частиц представлены на рис. 1. На рисунке приведены три пары кривых, отвечающие различным отношениям масс сталкивающихся ядер $\gamma = 0,10, 0,28$ и $1,0$. Энергия бомбардирующих частиц дана в единицах величины барьера взаимодействия V_i , энергия компаунд-ядра - в единицах $V_i + Q$. Представленные графики построены по формулам /18-22/ работы /1/.

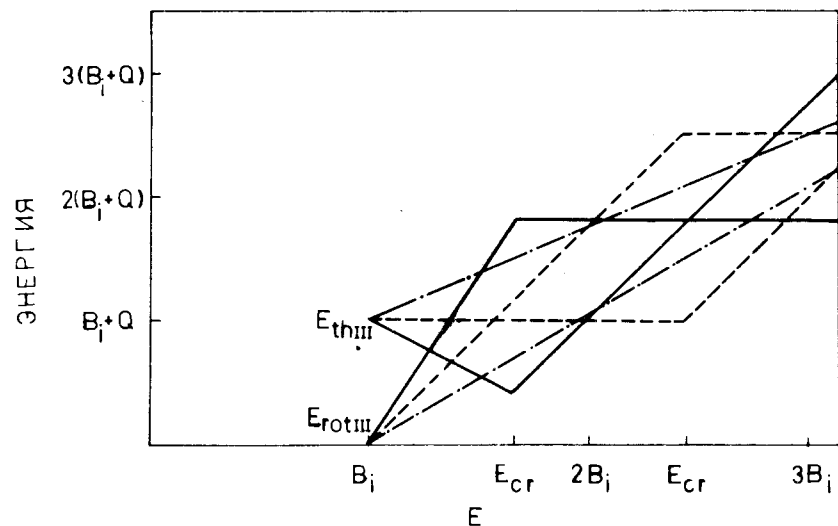


Рис. 1. Наименьшая энергия теплового возбуждения E_{thIII} и энергия вращения E_{rotIII} компаунд-ядра в зависимости от кинетической энергии бомбардирующих частиц (— — — — $\gamma = 1,0$; - - - - $\gamma = 0,28$; - · - · - · $\gamma = 0,10$).

Поскольку $E_{rotIII} \sim \ell_{max}(\ell_{max} + 1)$ при $E < E_{cr}$ и $E_{rotIII} \sim \ell_{cr}(\ell_{cr} + 1)$ при $E \geq E_{cr}$, то зависимость $E_{rotIII}(E)$ представляет также в относительных единицах квадрат предельного углового момента компаунд-ядра по входному каналу реакции.

Как видно из рисунка, для ядер с γ в интервале $1,0 \geq \gamma \geq 0,28$ наименьшая энергия теплового возбуждения компаунд-ядра снижается при увеличении энергии бомбардирующих частиц от V_i до E_{cr} . Уменьшение E_{thIII} на начальном этапе роста E объясняется тем, что по мере увеличения энергии бомбардирующих частиц все

большая часть начальной потенциальной ядерной энергии системы $V_i + Q$ затрачивается на необходимое увеличение энергии вращения при слиянии ядер и не переходит в тепловую энергию. При $E = E_{cr}$ наименьшая тепловая энергия $E_{thIIImin}$, отвечающая относительному минимуму, достигает и абсолютного минимума. Для $\gamma = 1,0$ этот минимум наиболее низок и равен $E_{thIIImin} = 0,33(V_i + Q)$.

Заметим, что в случае $\gamma \approx 1$ средняя энергия теплового возбуждения компаунд-ядра $\bar{E}_{th} = E + Q - E_{rot} = E + Q - \frac{1}{2}E_{rotIII}$ хотя и возрастает при увеличении

E от V_i до E_{cr} , однако этот рост составляет всего $\sim 17\%$ от превышения E над V_i и равен $\sim 0,2(V_i + Q)$. При дальнейшем увеличении E вся избыточная сверх E_{cr} энергия бомбардирующей частицы переходит в тепловую. При таком неравномерном росте \bar{E}_{th} функции возбуждения реакций типа (H.I., xn) могут иметь отклонения от обычного хода.

Для сталкивающихся ядер с $\gamma < 0,28$ наименьшая тепловая энергия компаунд-ядра увеличивается на начальном этапе с ростом E , однако это увеличение более медленное, чем рост E .

Энергия вращения компаунд-ядра и его угловой момент достигают своих предельных значений при $E = E_{cr}$.

Проделанный анализ слияния двух ядер показывает, что возможны компаунд-ядра с тепловой энергией, существенно меньшей, чем величина $V_i + Q$, и критическим по входному каналу реакции угловым моментом. Для получения таких ядер необходимо использовать слияние равных или близких по массам ядер с энергией бомбардирующих частиц $E = E_{cr}$. Конкретные значения E_{thIII} и ℓ_{cr} зависят также от $V_i + Q$ и могут быть найдены путем несложных вычислений.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ МИНИМАЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ И КРИТИЧЕСКОГО УГЛОВОГО МОМЕНТА КОМПАУНД-ЯДЕР

Формулы /23/ и /16/ были использованы для расчета минимальной тепловой энергии $E_{thIIImin}$ компаунд-ядер и их критического углового момента l_{cr} . Расчет производился для различных комбинаций сталкивающихся ядер в широкой области значений Z_1 и Z_2 . В случае полиизотопных элементов выбирался наиболее плотно-упакованный изотоп, однако содержащийся в достаточном /не менее нескольких процентов/ количестве в природной смеси. Рассматривались пары ядер только с отношением масс $\gamma > 0,28$, при слиянии которых $E_{thIIImin}$ ниже $B_i + Q$.

Величина Q рассчитывалась по известным экспериментальным значениям атомных масс или по вычисленным ядерным массам, приведенным в работе /3/.

Величина барьера для взаимодействия ядер вычислялась по формуле, полученной в работе /4/:

$$B_i = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r_i (A_1^{1/3} + A_2^{1/3})} + V_N,$$

где r_i определяется в зависимости от значения параметра $Z_1 Z_2 / (A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$, а V_N - в зависимости от полученной величины r_i по графикам, приведенным в работе /4/.

Как показано авторами /4/, эта формула достаточно хорошо воспроизводит экспериментальные значения барьеров взаимодействия ядер вплоть до $Z_1 \cdot Z_2 \sim 2800$.

Полученные значения $E_{thIIImin}$, выраженные в МэВ и округленные до целых единиц, приведены на координатной плоскости рис. 2. По осям координат отложены порядковые номера Z_1 и Z_2 сталкивающихся ядер и указаны конкретные изотопы, для которых производился расчет.

Наиболее низкими значения минимальной энергии теплового возбуждения для данного компаунд-ядра получают при слиянии равных или близких по массе ядер.

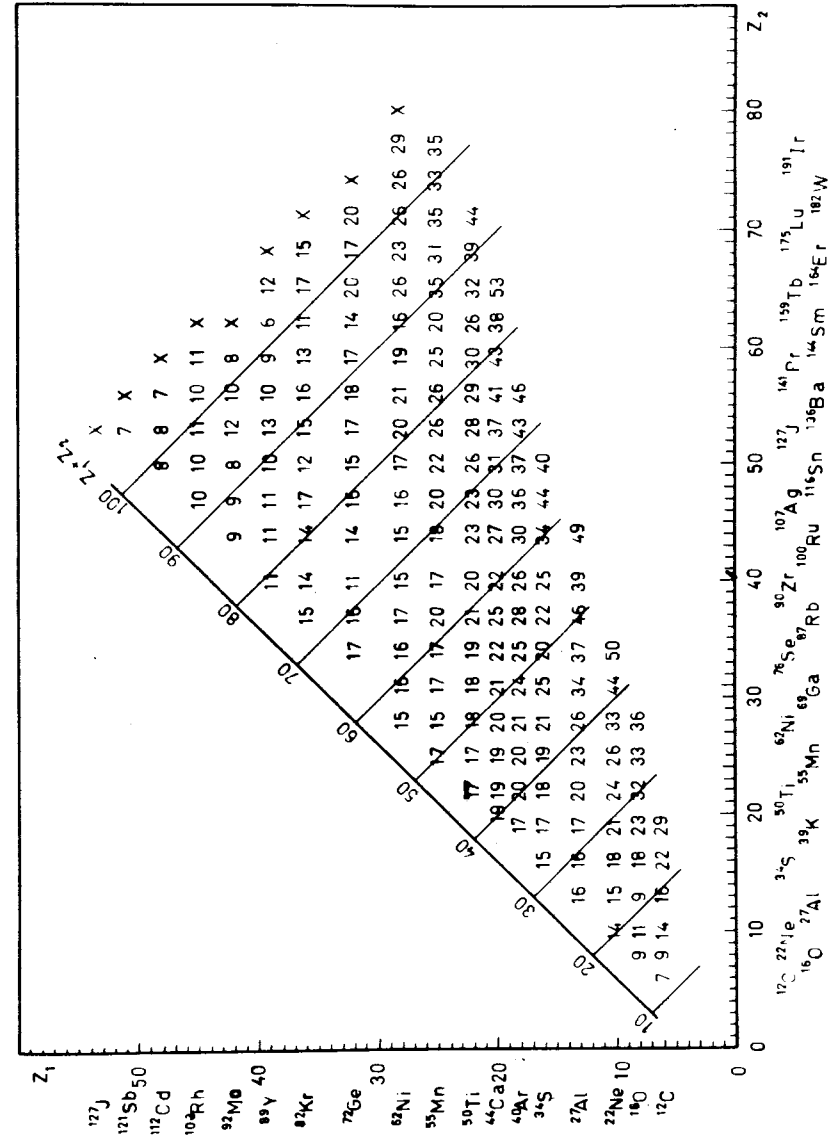


Рис. 2. Минимальная энергия теплового возбуждения $E_{thIIImin}$ компаунд-ядра в МэВ для различных комбинаций бомбардирующей частицы (Z_1) - мишень (Z_2). Знаком \times отмечены компаунд-ядра, нестабильные по отношению к делению из основного состояния /3/.

Это говорит о том, что определяющим фактором в установлении энергии теплового возбуждения компаунд-ядра являются общие закономерности, отмеченные в работе /1/. Различия в величинах V_1+Q для разных пар частица - мишень при образовании одного и того же компаунд-ядра не очень велики. Однако значительные отклонения от монотонного изменения в значениях Q , наблюдающиеся для ядер с замкнутыми оболочками, все же проявляются. Это отражается в несколько меньших значениях $E_{thIIImin}$ для ядер с $Z_{1,2}=50$ и $N_{1,2}=50,82$ по сравнению с соседними ядрами.

Знаком \times на рисунке отмечены ядра, нестабильные, согласно /3/, по отношению к делению из основного состояния. Это сильно нейтродефицитные ядра с высоким значением параметра делимости Z^2/A и $Z=104-108$.

На рис. 3 даны вычисленные значения критических угловых моментов l_{cr} в единицах \hbar для различных пар сталкивающихся ядер. Для компаунд-ядер с заданным $Z=Z_1+Z_2$ значения l_{cr} несколько различаются, однако эти различия меньше, чем изменения тепловой энергии. Более плотная упаковка ядер с замкнутыми оболочками здесь также проявляется для ядер с $Z_{1,2}=50$ и $N_{1,2}=50,82$.

Наряду с критическим угловым моментом по входному каналу реакции слияния ядро характеризуется также некоторым угловым моментом l_{crf} , начиная с которого оно становится нестабильным по отношению к делению. Поэтому в тех случаях, когда $l_{crf} < l_{cr}$, полное слияние ядер с образованием компаунд-ядра будет частично ограничено. Столкновения ядер с орбитальным угловым моментом в интервале от l_{crf} до l_{cr} будут приводить к распаду составной системы по открытым каналам деления до наступления полного слияния и образования компаунд-ядра. Если сопоставить полученные значения l_{cr} с результатами, например, работы /5/, в которой рассмотрены критические угловые моменты ядер по отношению к делению, то можно сказать, что для компаунд-ядер с $Z \leq 60$ определяющими будут критические угловые моменты l_{cr} по входному каналу реакции слияния.

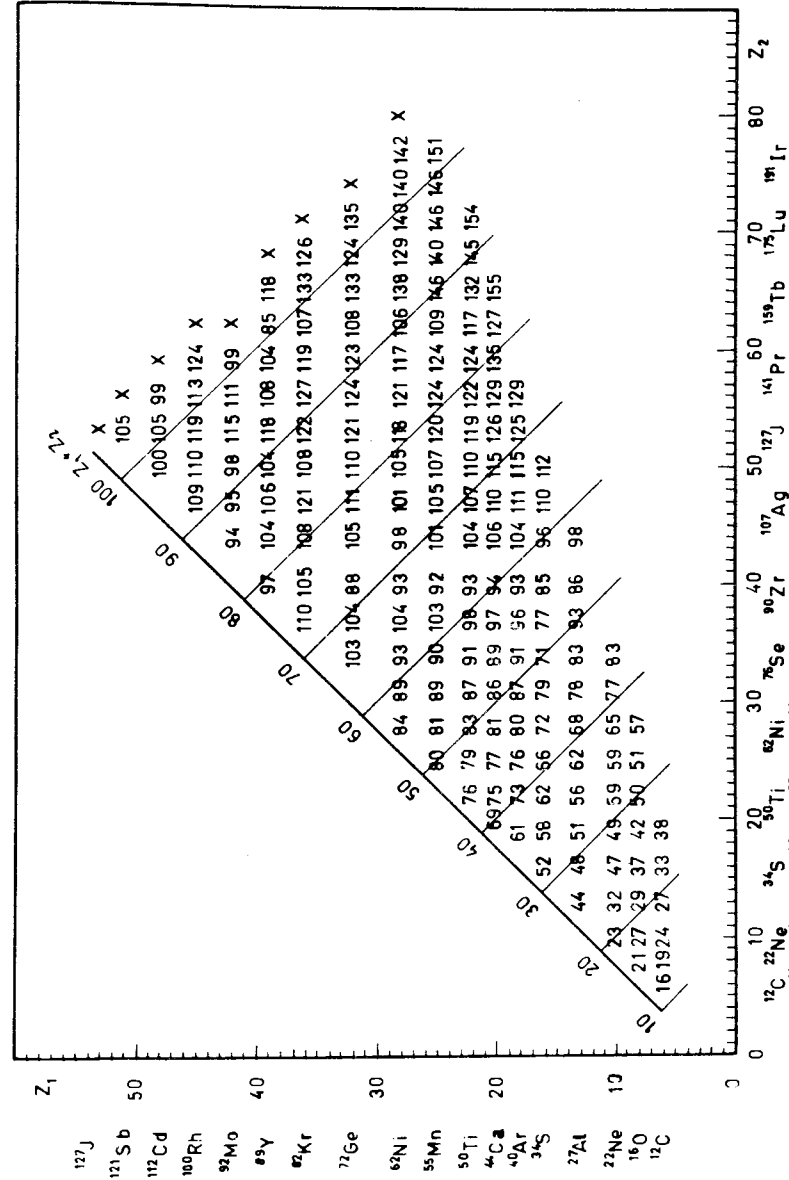


Рис.3. Критический угловой момент компаунд-ядра l_{cr} в единицах \hbar по входному каналу реакции слияния для различных комбинаций бомбардирующей частица (Z_1) - мишень (Z_2). Знаком \times отмечены компаунд-ядра, нестабильные по отношению к делению из основного состояния /3/.

При вычислении минимальной энергии теплового возбуждения компаунд-ядер и их критического углового момента использовалась простая модель, основанная, в частности, на допущении сферической формы сталкивающихся ядер и компаунд-ядра. Более детальное рассмотрение требует учета отклонения формы реального ядра от сферы. Однако вклад отклонения формы компаунд-ядра от сферической в результате его вращения, по видимому, несущественен при вычислении минимального теплового возбуждения и критического углового момента в рамках принятой модели. Это связано с тем, что сплющивание компаунд-ядра приводит одновременно и к уменьшению $E_{\text{rot III}}$ из-за увеличения момента инерции, и к уменьшению $V_1 + Q$ из-за деформации компаунд-ядра и повышения энергии его основного состояния /увеличение m_3 /. Эти два эффекта могут взаимно компенсировать друг друга в балансе ядерной энергии, с одной стороны, и кулоновской и вращательной энергий, с другой, при образовании компаунд-ядра.

Отклонение от сферичности сталкивающихся ядер, выражающееся в вытянутой или в сплюснутой форме ядер, будет проявляться в изменении $E_{\text{rot I}}$ и $E_{\text{rot II}}$. Однако эти изменения будут иметь разные знаки при различной ориентации осей симметрии ядер по отношению к направлению их сближения и в среднем могут не проявляться.

Заметим, что вычисленные в настоящей работе значения l_{cr} были сопоставлены со значениями критических угловых моментов, полученными из экспериментальных данных по сечениям реакций ^{6/}. Вычисленные значения удовлетворительно совпали с экспериментальными величинами для тех комбинаций сталкивающихся ядер, которые были приведены в работе ^{6/}, начиная от реакции $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ / $l_{\text{cr}} = 36$ в работе ^{6/} и $l_{\text{cr}} = 27$ в настоящей работе / и кончая реакцией $^{40}\text{Ar} + ^{109}\text{Ag}$ / $l_{\text{cr}} = 113$ в работе ^{6/} и $l_{\text{cr}} = 111$ в настоящей работе /.

Таким образом, проведенные вычисления показывают, что возможны реакции слияния ядер, приводящие к образованию относительно холодных компаунд-ядер с высоким угловым моментом. Например, при облучении ^{90}Zr ионами ^{72}Ge с энергией 340 МэВ в лабораторной

системе координат могут быть получены компаунд-ядра ^{162}Hf с энергией теплового возбуждения 11 МэВ и угловым моментом 88ħ. Первый этап де возбуждения такого ядра должен происходить главным образом путем испускания небольшого числа γ -квантов статистического каскада /ожидаемые ^{3/} энергия связи нейтрона $V_n = 10,8$ МэВ и эффективная энергия связи протона $V'_p = V_p + V_p = 14$ МэВ/, в результате которого компаунд-ядро должно перейти на ираст-уровень без существенного уменьшения углового момента.

Автор выражает благодарность академику Г.Н.Флерову за содействие настоящей работе, а также Ю.Ц.Оганесяну и Б.И.Пустыльнику за плодотворные дискуссии.

Литература

1. Н.И.Тарантин. Сообщение ОИЯИ, Р7-10342, Дубна, 1976.
2. Н.И.Тарантин. Механизм ядерных реакций под действием тяжелых ионов. В кн.: Ядерная химия. М., "Наука", 1965, с. 182.
3. W.D.Myers and W.J.Swiatecki. Nucl.Phys., 81, 1, 1966; Report UCRL-11980, 1965.
4. C.Ngo, B.Tamain, J.Galin, M.Beiner and R.J.Lombard. Nucl.Phys., A240, 353, 1975.
5. S.Cohen, F.Plasil and W.J.Swiatecki. Ann.Phys., 82, 557, 1974.
6. M.Lefort. Rep.Prog.Phys., 39, 129, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 декабря 1976 года.