

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

1849/82

19/4-82

P7-82-29

В.И.Кузнецов

О ВЕРОЯТНОСТИ ЗАПАЗДЫВАЮЩЕГО ДЕЛЕНИЯ
НЕЙТРОНОДЕФИЦИТНЫХ ЯДЕР

Направлено в журнал "Вопросы атомной науки
и техники", серия "Ядерные константы".

1982

С ростом нейтронного дефицита энергии электронного захвата $Q_{\beta\beta}$ увеличивается и наступает момент, когда $Q_{\beta\beta}$ становится величиной одного порядка или превосходит барьер деления дочернего ядра. В этом случае после электронного захвата или β^+ -распада энергия возбуждения дочернего ядра может оказаться достаточной, чтобы произошло деление с заметной вероятностью. Такой процесс, как известно, носит название запаздывающего деления ^{1/1}.

В последнее время в связи с развитием ускорительной техники ^{2/2} намечались пути синтеза тяжелых нейтронодефицитных ядер в широком диапазоне A и Z , в том числе ядер, лежащих левее оболочки $N=126$. В связи с этим были выполнены расчеты вероятности P запаздывающего деления после распада материнского нейтронодефицитного ядра в области Z от 94 до 101.

Запаздывающее деление заметно проявляется, начиная с $Z > 94$. В области $Z \leq 94$ /89-93/ запаздывающее деление, по-видимому, могут испытывать лишь отдельные ядра ^{3/3}. Если $Z > 101$, расчеты становятся мало достоверными, так как в этом случае значительную роль начинает играть спонтанное деление, оценить влияние которого в области ядер со значительным нейтронным дефицитом в настоящее время затруднительно. Этими соображениями и определен интервал Z , для которого выполнены расчеты. В рассматриваемой области ядер электронный захват и β^+ -распад конкурируют с α -распадом.

Вероятность P определяется соотношением:

$$P = \frac{T_{\alpha}}{T_{K+\beta^+} + T_{\alpha}} \left(\frac{K/\beta^+}{1+K/\beta^+} P_{Kf} + \frac{1}{1+K/\beta^+} P_{\beta^+f} \right). \quad /1/$$

Здесь T_{α} - парциальный период полураспада по отношению к α -распаду, $T_{K+\beta^+}$ - парциальный период β -распада материнского ядра, K/β^+ - коэффициент разветвления для разрешенных переходов, P_{Kf} - вероятность запаздывающего деления после электронного захвата, P_{β^+f} - вероятность запаздывающего деления после β^+ -распада. Расчеты T_{α} , $T_{\beta\beta}$ были выполнены с помощью формул ^{4/4}. Использовались значения коэффициентов разветвления K/β^+ , полученные теоретически ^{5,6/5,6} для разрешенных переходов.

Величины P_K определялись из соотношений:

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

$$P_{Kf} = \int_C^{Q_K} b(E) \frac{\Gamma_f(E) dE}{\Gamma_f(E) + \Gamma_\gamma(E)} \quad /2/$$

Здесь Q_K - энергия К-захвата, C - энергия обрезания, обусловленная эффектом спаривания /для нечетно-нечетных ядер $C = 26 A^{-1/2}$ МэВ, а для ядер с нечетной массой - вдвое меньше/, Γ_f и Γ_γ - ширина деления и γ - ширина. Вероятность заселения уровня дочернего ядра с энергией E :

$$b(E) = 1/2 S_\beta(E) \pi g_K^2(Z) (Q_K - E - V_K)^2 P_K^{-1},$$

где $\frac{1}{2} \pi g_K^2(Z)$ - средняя величина радиальной волновой функции материнского ядра, V_K - энергия связи К-электрона в дочернем ядре, P_K - доля К-захвата в электронном захвате, Q_K - энергия К-захвата. В предположении $S_\beta = \text{const } E > C$ и $S_\beta = 0 \quad E < C$ и $P_K = 1$. Пренебрегая членами порядка V_K по сравнению с величиной $Q_K - C$, получим после нормировки:

$$b(E) = 3(Q_K - E)^2 (Q_K - C)^{-3} \quad /3/$$

В настоящее время проведены теоретические исследования, в которых показано, что $S_\beta(E)$ может иметь низколежащую структуру, влияющую на вероятность запаздывающего деления^{/7/}. Однако расчет $S_\beta(E)$ для нейтронодефицитных ядер весьма затруднен. В более простых случаях нейтроноизбыточных нуклидов получены лишь положения низколежащих максимумов $S_\beta(E)$. Вместе с тем в ряде работ /см. напр. /8/ / показано, что предположений о постоянстве $S_\beta(E)$ дают возможность правильно оценить порядок P_{Kf} , что вполне определяет область возможных запаздывающих излучателей. Величина Γ_f рассчитывалась по формулам работы^{/9/} в приближении одномерного параболического барьера, с использованием для плотности уровней $\rho(E)$ выражения: $\rho(E) = A \exp(2\sqrt{aE})$. Ширина Γ_γ вычислялась в предположении, что осуществляются только переходы типа $E1$, т.е. вероятность перехода пропорциональна E_γ^3 /см. /10/ /.

В случае β^+ -распада функция Ферми $f(Q_\beta - E, Z) \sim (Q_\beta - E)^5$. С учетом этого обстоятельства вычислялась вероятность P_{β^+f} . Высоты барьеров V_f , величины Q_K брались из таблиц работы^{/11/}.

Результаты расчетов величин P приведены на рис.1,2 и 3 для нечетно-нечетных ядер, нечетно-четных ядер $Z[95,101]$ и для ядер четно-нечетных $Z[94,100]$ в зависимости от числа нейтронов в ядре.

Следует заметить, что величины P принимают максимальные значения в узком диапазоне значений N от 120 до 125 нейтронов и от 132 до 135 нейтронов. Эти максимумы обусловлены влиянием оболочки $N = 126$ и ростом барьера деления правее $N = 126$

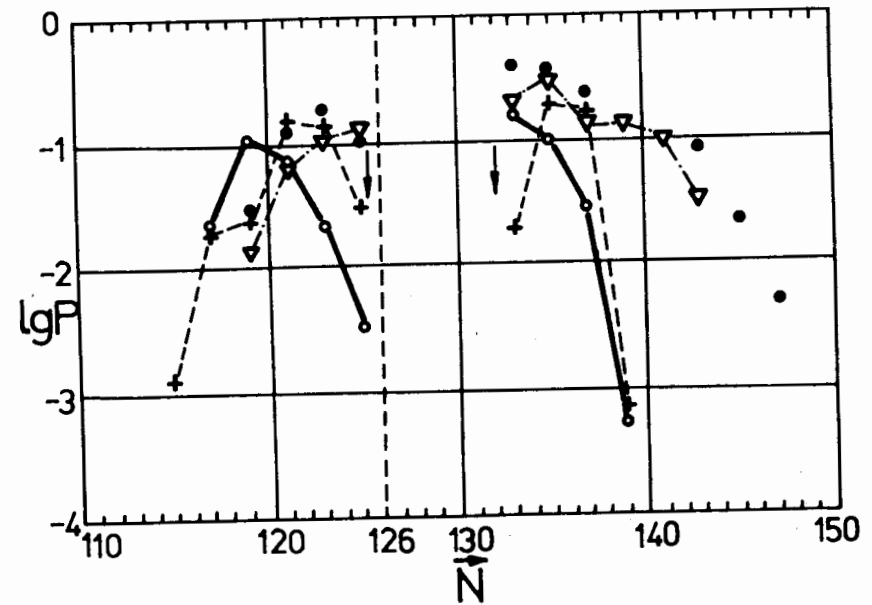


Рис.1. Зависимость $\lg P$ нечетно-нечетных ядер от числа нейтронов в ядре N для $Z: 95$ /светлый кружок/, 97 /крест/, 99 /треугольник/ и 101 /темный кружок/.

с уменьшением нейтронного дефицита. В промежутке значений N от 126 до 132 вероятность P меньше максимальной примерно на четыре порядка. Величина P в первом приближении экспоненциально зависит от высоты барьера V_f , если $Q_K < V_f$. В случае $Q_K > V_f + \Delta E$ изменение P_{Kf} при вариации V_f в пределах $V_f + \Delta E$ в первом приближении $\sim \left(\frac{Q - V_f}{Q}\right)^3$ сравнительно невелико. В областях максимумов P условие $Q_K > V_f$ всюду выполняется, и, следовательно, ошибка в теоретических расчетах V_f , естественно неизбежная для ядер, удаленных более чем на 10 нейтронов от линии β -стабильности, не влияет существенным образом на положение максимумов $P(N)$. Следует отметить, что при условии $Q_K > V_f$ вероятности нечетно-четных ядер P_{Kf} и P_{β^+f} не отличаются по порядку величины существенным образом от этих величин для нечетно-нечетных ядер.

Для $N < 115$ вероятности P не вычислялись, так как ядра с $N < 115$ в обозримом будущем недостижимы для экспериментальных исследований по причине малости их сечений образования и времени жизни. Кроме того, здесь результаты вычислений

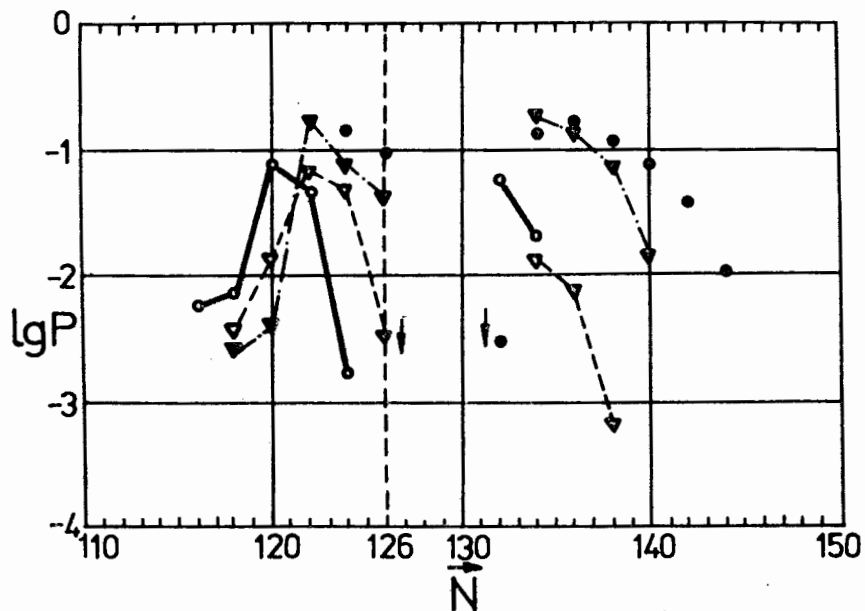


Рис.2. Зависимость $\lg P$ нечетно-четных ядер от числа нейтронов для Z ; 95 /светлый кружок/, 97, 99 /светлый и темный треугольники/ и 101 /темный кружок/.

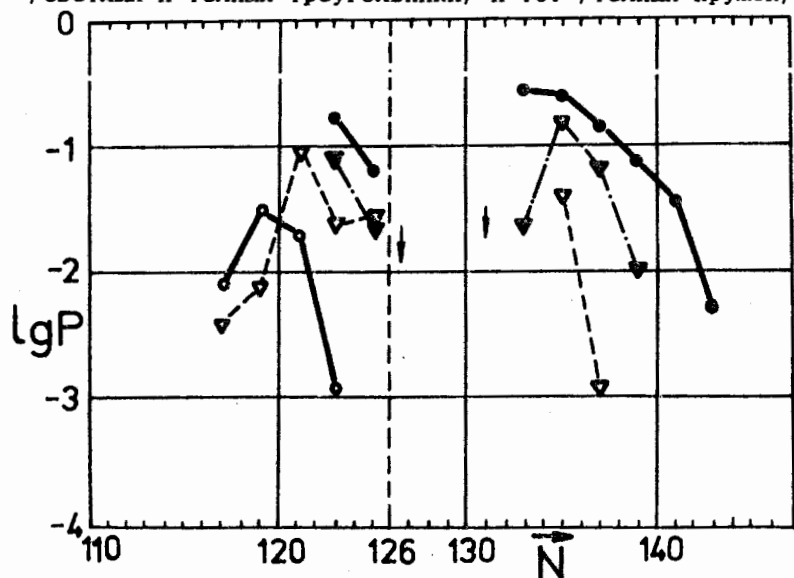
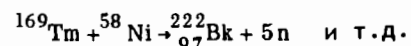
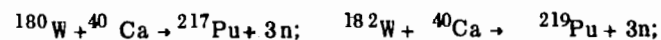


Рис.3. Зависимость $\lg P$ четно-нечетных ядер от числа нейтронов для Z ; 94 /светлый кружок/, 96, 98 /светлый и темный треугольники/ и 100 /темный кружок/.

становятся менее надежными ввиду уменьшения достоверности экстраполяции T_{α} , $T_{K+\beta^+}$, V_f .

Характерные значения P_{Kf} и P_{β^+} , P для изотопов с Z от 94 до 101 приведены в таблице.

Синтез нейтронодефицитных нуклидов, принадлежащих к области $N \leq 126$, в настоящее время возможен на пучках тяжелых ионов в разнообразных ядерных реакциях, например:



ТАБЛИЦА

атомный номер	массовое число	число нейтронов	P_{Kf}	P_{β^+}	P
94	215	121	0,06	$8,3 \cdot 10^{-4}$	0,020
	-	-	-	-	-
95	217	122	0,076	0,041	0,049
	232	137	0,040	10^{-15}	0,030
96	219	123	0,084	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,025
	231	135	0,047	$4,0 \cdot 10^{-6}$	0,039
97	221	124	0,098	0,004	0,052
	233	136	0,010	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$
98	233	125	0,083	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,024
	233	135	0,220	0,016	0,150
99	224	125	0,200	0,120	0,130
	236	137	0,290	0,036	0,170
100	225	125	0,210	0,027	0,064
	235	135	0,470	0,150	0,260
101	225	124	0,390	0,110	0,150
	237	136	0,400	0,100	0,170

Сечения образования $\sigma_{\text{зд}}$ ввиду малости отношения: (Γ_n / Γ_f) , особенно для последних каскадов испарения нейтронов, в реакциях HI , zn лежат в области мкб. Поэтому наблюдение запаздывающего деления /сечение образования $\sigma^+ = P \sigma_{\text{зд}}$ / может быть осуществлено на пучках тяжелых ионов с интенсивностью $\sim 10^{14}$ частиц/с. Такие интенсивности достижимы сегодня на пучках современных циклотронов многозарядных ионов.

В заключение автор благодарит академика Г.Н.Флерова за поддержку работы, профессора Ю.Ц.Оганесяна за ценные советы, Ю.П.Гангрского - за плодотворное обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В.И., Скобелев Н.К., Флеров Г.Н. ЯФ, 5, с. 1136, 1967.
2. Оганесян Ю.Ц. ОИЯИ, Р9-12843, Дубна, 1979.
3. Лазарев Ю.А., Оганесян Ю.Ц., Кузнецов В.А. ОИЯИ, Е7-80-719, Дубна 1980.
4. Колесников Н.Н., Демин А.Г., Черепанов Е.А. ОИЯИ, Д4-80-572, Дубна, 1980.
5. Zweifel P.F. PR 107329, 1957.
6. Wapstra A.H. Nijgh and R. van Lieshout Nucl.Spectroscopy Tables, North-Holland Publ. Co, Amsterdam, 1959.
7. Klapdor H.V. et al. Physics Letters, 1978, v. 78B, No.1.
8. Aleklett K., Nyman Y., Rudstam J. Nucl.Phys., 1975, A245, p. 425.
9. Кузнецов В.И. ЯФ, 1979, 30, с. 321.
10. Back B.V. et al. Phys.Rev., 1974, C9, p. 1924.
11. Myers W.D. Droplet Model of Atomic Nuclei, New York, IFI=Plenum, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 января 1982 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

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

Д1,2-9224	IV Международный семинар по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1975.	3 р. 60 к.
Д-9920	Труды Международной конференции по избранным вопросам структуры ядра. Дубна, 1976.	3 р. 50 к.
Д9-10500	Труды II Симпозиума по коллективным методам ускорения. Дубна, 1976.	2 р. 50 к.
Д2-10533	Труды X Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Баку, 1976.	3 р. 50 к.
Д13-11182	Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977.	5 р. 00 к.
Д17-11490	Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.
Д6-11574	Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978.	2 р. 50 к.
Д3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	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.
Д1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
Д1,2-12450	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.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.

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

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Кузнецов В.И. О вероятности запаздывающего деления нейтронодефицитных ядер

P7-82-29

Рассчитаны вероятности запаздывающего деления нейтронодефицитных ядер в области Z от 94 до 101. Показано, что вероятность P запаздывающего деления на один распад исходного материнского ядра имеет максимум при числе нейтронов в ядрах 120-125 и 132-136 для материнских нечетно-нечетных ядер и ядер с нечетной массой. Приведены некоторые реакции на тяжелых ионах, ведущие к образованию нейтронодефицитных запаздывающих излучателей с числом нейтронов, меньшим 126.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Kuznetsov V.I. On a Probability of Delayed Fission of Neutron-Deficient Nuclei

P7-82-29

The probabilities of delayed fission of neutron-deficient nuclei in 94 up to 101 Z region are calculated. It is shown that the P probability of delayed fission per one decay of initial nucleus has a maximum in the regions of $N=120-125$ and $N=132-136$ for initial odd-odd nuclei and nuclei with odd mass. Some reactions induced by heavy ions resulting in the production of neutron-deficient delayed emitter with $N < 126$ are given.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.