

ИСПУСКАНИЕ МЮОНОВ ПРИ МГНОВЕННОМ ДЕЛЕНИИ ЯДЕР УРАНА МЮОНАМИ

Г.Е. Беловицкий, В.Н. Баранов, К. Петижан*

Впервые получены угловое и энергетическое распределения, а также вероятность эмиссии мюонов конверсии, испускаемых при мгновенном делении ядер урана мюонами. Определена мультипольность гамма-излучения ($E_\gamma > 3$ МэВ) осколков.

Деление ядер медленными отрицательными мюонами за счет энергий безрадиационных мезоатомных переходов принято называть мгновенным делением. При мгновенном делении мюон не погибает, а увлекается одним из осколков. В дальнейшем он может быть сброшен с возбужденного осколка в непрерывный спектр за счет процесса внутренней конверсии; испытать $\mu \rightarrow e$ распад или поглотиться осколком, в результате чего будут испускаться частицы (п, р, α).

Изучение углового и энергетического распределений, а также вероятность конверсии мюонов позволяют определить мультипольность жесткой части гамма-излучения осколков ($E_\gamma > 3$ МэВ).

Методика эксперимента. В качестве мишени и детектора заряженных частиц использовались фотоэмульсии Госниихимфотопроект типов К и Р толщиной ~ 150 мкм, которые регистрировали мюоны с энергией до 6 МэВ (тип К) и частицы любых энергий (тип Р). Методика введения солей урана в фотослой, облучения на пучке мюонов и просмотра фотопластинок описана в /1/.

Было проанализировано $\sim 4 \cdot 10^5$ делений ядер урана. Отбирались события, в которых из точки деления (за время $< 10^{-13}$ с с момента деления) вылетает частица с $z = 1$, останавливающаяся в фотослое. При увеличении $\sim 2000^x$ измерялись пробеги легкого (R_L) и тяжелого (R_H) осколков ($R_H < R_L$) и частицы, пространственный угол между ними, а также ионизация на следе частицы (число зерен или просветов на всей длине следа).

Частицы с $z = 1$ могли быть мюонами, протонами, испущенными до деления или в процессе деления, и протонами отдачи. Природа частицы определялась по двум параметрам — ионизации и пробегу — с помощью калибровочных кривых, полученных для следов остановившихся мюонов и протонов. Для выявления протонов отдачи использовалась кинематика упругих соударений.

На фотоэмульсиях типа Р мюоны идентифицировались по $\mu \rightarrow e$ распадам. По таким событиям дополнительно проверялась надежность применения кинематики упругих соударений. Было выявлено 184 мюона конверсии с $E_\mu > 0,5$ МэВ. Точность определения их энергий $\sim (2 - 10)\%$. На рис. 1 приведен микрорисунок мгновенного деления ядра урана, сопровождаемого испусканием мюона, который испытал $\mu \rightarrow e$ распад. Эффективность регистрации делений без вылета и с вылетом заряженных частиц рассмотрена в /1/.

Энергетическое распределение мюонов конверсии. Для получения энергетического распределения мюонов конверсии использовались частицы, остановившиеся в фотослое и образующие с плоскостью фотоэмульсии угол $\leq 45^\circ$. Так же как и в /1/, были рассчитаны поправки на вылет частиц из фотослоя. На рис. 2 приведено экспериментальное (исправленное) энергетическое распределение мюонов конверсии (для $E_\mu > 0,5$ МэВ). Наибольшая наблюдавшаяся энергия мюонов равна 2,3 МэВ, что значительно меньше максимально возможной энергии (4 — 5) МэВ.

Теоретические спектры мюонов конверсии с легкого и тяжелого осколков различаются слабо и качественно согласуются с экспериментальным. Имеются, однако, указания на то, что последний мягче расчетного.

Определение вероятности процесса конверсии. Исходя из энергетического спектра мюонов, рассчитана вероятность процесса конверсии мюонов с энергией более 0,5 МэВ на один акт мгновенного деления

* Швейцария, СН-5254, Виллиген, СИН.

$$P(E_{\mu} > 0,5) = N_{\mu} / N_p = (0,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-2}.$$

Здесь $N_{\mu} = 213$ — число мюонов с $E_{\mu} > 0,5$ МэВ; N_p — число мгновенных делений; $N_p = wN_t$, где $w = 8,5 \cdot 10^{-2}$ — вероятность мгновенного деления ядер ^{238}U /2/, $N_t = 3,16 \cdot 10^5$ — полное число делений. Указана статистическая ошибка.

Значение $P(> 0,5)$ находится в удовлетворительном согласии с полученным в /3/. Из теоретического спектра мюонов конверсии /4, 5/ следует, что доля мюонов с $E_{\mu} > 0,5$ МэВ составляет $\sim 0,5$ от полного спектра. Отсюда следует, что $P(E_{\mu} > 0) = (1,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$.

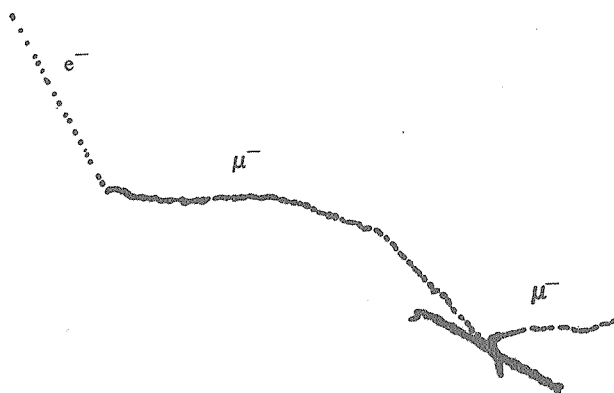


Рис. 1

Рис. 1. Микрорисунок мгновенного деления ядра урана, при котором мюон конверсии испытывает $\mu \rightarrow e$ распад.

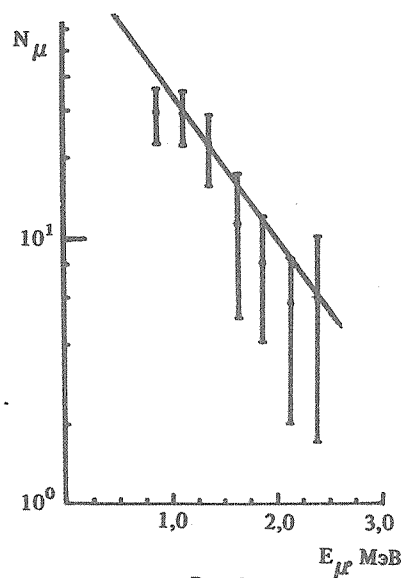


Рис. 2

Рис. 2. Энергетическое распределение мюонов конверсии (прямая линия — расчет).

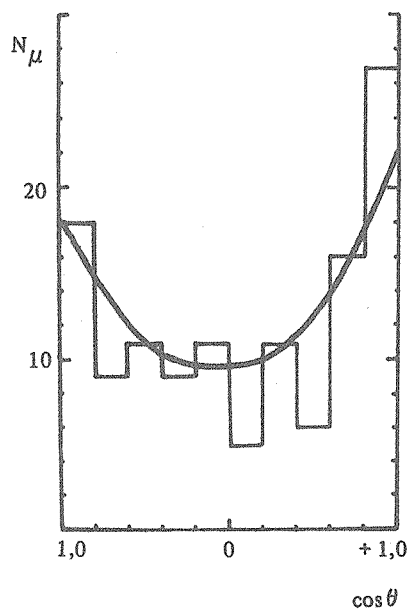


Рис. 3

Рис. 3. Угловое распределение мюонов конверсии (кривая линия — расчет).

Угловое распределение мюонов конверсии. На рис. 3 приведено угловое распределение мюонов конверсии с $E_{\mu} > 0,5$ МэВ. По оси абсцисс отложен косинус угла между направлениями движения мюона и тяжелого осколка, по оси ординат — число мюонов в данном угловом интервале.

В качестве характеристики углового распределения в дальнейшем используется отношение числа мюонов, испущенных под углами меньшими и большими 90° к направлению движения тяжелого осколка.

$$N(<90^{\circ})/N(>90^{\circ}) = 65/58 = (1,1 \pm 0,2).$$

Расчет вероятности конверсии. Полная вероятность конверсии мюона на одно мгновенное деление $P(EJ)$ для гамма-излучения мультиполярности EJ может быть представлена в виде двух сумм для легких и тяжелых осколков

$$P(EJ) = \sum_L V(z_i)W(z_i)P(z_i, EJ) + \sum_H V(z_i)W(z_i)P(z_i, EJ).$$

Здесь $V(z_i)$ — вероятности выхода осколков с данным z_i , полученные из данных /6/. Вероятности увлечения мюона осколком с z_i рассчитаны по формуле /7/

$$W(z_i) = \{1 + \exp[b(46 - z_i)]\}^{-1},$$

где b — свободный параметр.

Вероятность увлечения мюонов легкими осколками W_L измерялась в /3, 8, 9/ и рассчитывалась в /5, 7, 10/. Большинство значений W_L лежат в интервале (0,06 — 0,1). Функция $P(z_i, EJ)$ — вероятность конверсии мюона с осколком z_i для мультиполярности EJ. Эти вероятности получены в /5/.

Результаты расчетов величин Σ и их суммы P приведены в табл. 1

Таблица 1
Результаты расчетов величин Σ и P , 10^{-2}

	$W_L = 0,05$		$W_L = 0,06$		$W_L = 0,085$	
	E1	E2	E1	E2	E1	E2
Σ_L	0,55	2,2	0,7	2,8	1,12	4,66
Σ_H	0,42	5,6	0,4	5,6	0,36	5,36
$P(EJ)$	0,97	7,8	1,1	8,4	1,48	10,02

Расчет углового распределения мюонов конверсии. Теоретические расчеты углового распределения выполнены в /5/. Оказалось, что угловое распределение мюонов конверсии не зависит от z_i и энергии перехода, а только от спина осколка и мультиполярности перехода. В с.д.м. движущегося осколка вероятности испускания мюона под углами θ и $\pi - \theta$ к направлению движения осколка одинаковы для любой мультиполярности перехода. В л.с.к. преобладает эмиссия мюонов по направлению движения осколка.

Для сравнения с экспериментом рассчитаны два интегральных угловых распределения (в л.с.к.) для мюонов с энергией $> 0,5$ МэВ в предположении что: а) все мюоны испущены из легкого осколка; б) все мюоны испущены из тяжелого осколка. Суммируя эти распределения с различными весами, можно получить угловое распределение, согласующееся с экспериментальным значением отношения $N(< 90^{\circ})/N(> 90^{\circ}) = 1,1$. При этом вклад легких осколков в конверсию оказался равным 30 — 35%, а тяжелых 65 — 70%.

Обсуждение полученных результатов. Экспериментальная вероятность конверсии $P(E_{\mu} > 0) = 1,6 \cdot 10^{-2}$. Отношение вероятностей конверсии с тяжелого P_H и легкого P_L осколков $P_H/P_L = 1,8$. Отсюда $P_H = 1,05 \cdot 10^{-2}$, $P_L = 0,55 \cdot 10^{-2}$. При сравнении этих данных с расчетными (табл. 1) видно, что для

E1-переходов расчетное значение $\frac{\sum \Gamma}{\sum \Pi} < 1$, т.е. заметно меньше экспериментального. В работе /9/ получено $W_L = (0,07 \pm 0,02)$. Если $W_L = 0,05$, тогда расчет согласуется с экспериментом и наблюдаемое угловое распределение описывается в рамках рассмотренной модели (кривая на рис. 3). При этом мультипольность гамма-излучения тяжелого осколка ($0,9E1 + 0,1E2$), а легкого — E1. Этот результат получается из экспериментальных значений P_H, P_L и теоретических значений этих величин для E1- и E2-переходов, приведенных в таблице. При $W_L \geq 0,06$ теория уже не описывает наблюдаемого углового распределения. Однако согласие может быть достигнуто при условии, что энергетический спектр мюонов конверсии мягче теоретического.

Для более точного определения мультипольности гамма-излучения осколков, а также возможности получения с помощью конверсионных мюонов информации о процессе деления, необходимо уточнить экспериментальное и теоретическое значения W_L и выполнить измерения энергетического спектра мюонов конверсии в области $E_\mu < 0,5$ МэВ.

Авторы выражают благодарность профессору Ю.П. Блазеру и профессору И.М. Франку за поддержку работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беловицкий Г. Е. и др. ЯФ., 43, 1057 (1986).
2. Ahmad S. et al. Phys. Lett., 92B, 83 (1980).
3. Ganzorig Dr. et al. Phys. Lett., 77B, 257 (1978).
4. Барит И. Я. и др. Препринт П-0058, ИЯИ АН СССР, 1977.
5. Карпешин Ф. Ф. ЯФ., 32, 55 (1980); 40, 643 (1984).
6. David P. et al. Phys. Lett., 124B, 161 (1983).
7. Ma Z. et al. Nucl. Phys., A348, 446 (1980).
8. Schreder W. V. et al. Phys. Lett., 43B, 672 (1979).
9. Беловицкий Г. Е. и др. Письма в ЖЭТФ, 38, 212 (1983).
10. Voi P. et al. Phys. Lett., 132B, 39 (1983).

Институт ядерных исследований АН СССР

Поступила в редакцию 23 июля 1987 г.