

ИЗОТОПИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ, ВЫЗЫВАЕМЫХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ МЮОНАМИ

Г.Е. Беловицкий

Установлено соотношение, связывающее вероятность реакции $(\mu^-, \text{рхп})$ с параметром $(N - Z)/A$. Оно применимо в реакциях $(\mu, \text{рхп})$ как со стабильными, так и радиоактивными ядрами (осколками деления ядер).

При делении ядер отрицательными мюонами за счет энергии мезоатомных переходов (мгновенное деление) мюон не погибает, а увлекается, в основном, тяжелым осколком [1]. За время жизни мюона до его поглощения ($\sim 10^{-7}$ с) вероятность бета-распада осколков очень мала. Поэтому мюон поглощается осколком, содержащим в среднем 7 избыточных нейтронов, по сравнению со стабильным ядром с тем же z . Это открывает возможность изучения ядерных реакций на ядрах, далеких от области бета-стабильности.

Поглощение мюона ядром приводит к реакции $\mu^- + A = (A^*, z - 1) + \nu_{\mu}$. Большая часть выделяющейся энергии (~ 100 МэВ) уносится нейтрино. Энергия возбуждения ядра A^* лежит в широких пределах (от 0 до 60 МэВ), а ее среднее значение ~ 20 МэВ [2]. Снятие возбуждения ядра происходит в основном за счет эмиссии нейтронов и заряженных частиц [2,3,4]. Измерение вероятности эмиссии частиц из осколков и стабильных ядер с тем же z и сравнение их с расчетом позволяет выяснить влияние большого избытка нейтронов в осколках на механизм поглощения мюонов и испускание частиц из осколков. Теоретические значения вероятностей часто в 2 ÷ 4 раза отличаются от экспериментальных, а для интересующих нас ядер такие данные отсутствуют. Поэтому для решения поставленной задачи была предпринята попытка на основе имеющихся экспериментальных данных выявить общие закономерности для реакций, вызываемых мюонами.

Нас интересуют реакции с вылетом заряженных частиц (p,d,t). Основные экспериментальные данные для них получены в [4] активационным методом (где определяется только полное число частиц, вылетевших из ядра). Для 17 ядер с $Z = 11 \div 83$ были измерены вероятности реакций $P(\mu, p)$, $P(\mu, pn)$, $P(\mu, p2n)$, $P(\mu, p3n)$. Оказалось, что они относятся как 1:6:4:4. Эпизодически наблюдались реакции $(\mu, p4n)$ и $(\mu, p5n)$, вклад которых $< 10\%$ от вклада всех остальных реакций.

Зависимость $P(\mu, \text{рхп})$ (где $x = 0, 1, 2, 3$ — число нейтронов, вылетевших из ядра мишени) от высоты кулоновского барьера ядра V_c в [4] была представлена в виде:

$$P(\mu, \text{рхп}) \sim \exp(-\alpha V_c), \quad (1)$$

где α — константа (одна и та же для всех x).

В дальнейшем нас будет интересовать суммарная вероятность всех четырех реакций для всех частиц с $z = 1$, $P(\mu, \tilde{p})$, где $(\mu, \tilde{p}) = (\mu, p) + (\mu, pn) + (\mu, p2n) + \dots + (\mu, d) + (\mu, tn) + \dots$. Значения $P(\mu, \tilde{p})$ приведены в [2] и взяты в основном из [4]. В [4] не для всех ядер были измерены вероятности всех четырех реакций. Недостающие величины были рассчитаны, исходя из приведенного выше соотношения вероятностей реакций.

Зависимость $P(\mu, \text{рхп}) \sim \exp(-\alpha V_c)$ представлена на рис. 1, где по оси абсцисс отложена V_c ядра, а по оси ординат — $P(\mu, \tilde{p})$. В [4] для изотопов $^{63}, ^{65}\text{Cu}$ и $^{121}, ^{123}\text{Sb}$ были измерены $P(\mu, pn)$ и $P(\mu, p2n)$. Эти данные также приведены на рис. 1. Видно, что они не следуют соотношению (1), которое не описывает изотопический эффект, наблюдаемый и в реакциях (μ, \tilde{p}) . Из [6] следует, что (1) некорректно и с теоретической точки зрения. Для $P(\mu, \tilde{p})$ необходимо найти такую зависимость, которая учитывала бы влияние избытка нейтронов в ядре на величину $P(\mu, \tilde{p})$ и не противоречила теории.

Ранее аналогичная задача возникла при изучении реакций (n, p) под действием нейтронов с энергией 14 МэВ. Эмпирическим путем [5] было найдено соотношение

$$P(n,p) = 7,3 \exp[-33(N-Z)/A], \quad (2)$$

где $P(n,p)$ – вероятность реакции (n,p) ; A, N, Z – число нуклонов, нейтронов и протонов в ядре.

С помощью (2) можно вычислить $P(n,p)$ для широкого интервала A и, в частности, для изотопов любого элемента. Недавно выражение (2) было получено теоретически /6/ с использованием обычных статистических соотношений для сечения ядерных реакций. В /6/ показано, что соотношение (2) является следствием экспоненциальной зависимости сечения реакции (n,p) от двух основных величин: энергии связи протона в ядре и высоты кулоновского барьера.

Вернемся к реакциям (μ, \tilde{p}) . При расчете этих реакций распад составного ядра A^* описывается так же, как при реакции под действием нейтронов с энергией 14 МэВ /2,7/. Поэтому представляется оправданным выяснить, не окажется ли соотношение вида (2) применимым и для реакции (μ, \tilde{p}) .

С этой целью на рис. 2 представлены те же $P(\mu, \tilde{p})$, что и на рис. 1, как функция $(N-Z)/A$ составного ядра, а также экспериментальные данные для изотопов $^{63,65}\text{Cu}$ и $^{121,123}\text{Sb}$. (Для $^{63,65}\text{Cu}$ приведены и теоретические значения $P(\mu, \tilde{p})$ из /2/.) Видно, что этой зависимости удовлетворяет вся совокупность данных и, в частности, данные для изотопов Cu и Sb .

Для $P(\mu, \tilde{p})$ получено соотношение:

$$P(\mu, \tilde{p}) = a \exp[-b(N-Z)/A], \quad (3)$$

где константы $a = 1,58$; $b = 28,6$. Оно позволяет определять $P(\mu, \tilde{p})$ для ядер с $A > 30$, для которых такие данные отсутствуют, и, в частности, для стабильных ядер с большим избытком нейтронов. Соотношение (3) оказалось справедливым и для реакции с вылетом частиц с $z = 2$.

На рис. 2 приведены также расчетные значения $P(\mu, \tilde{p})$, полученные в /2,4,7/. Видно, что они следуют соотношению (3). В то же время $P(\mu, \tilde{p})$, рассчитанные для одного и того же ядра в разных работах, нередко отличаются в $2 \div 3$ раза между собой и от экспериментальных значений. Это указывает на необходимость дальнейшего усовершенствования теоретических моделей.

Теперь приведем результаты экспериментов по определению $P(\mu, \tilde{p})$ для тяжелых осколков, образующихся при мгновенном делении ядер урана мюонами /1/.

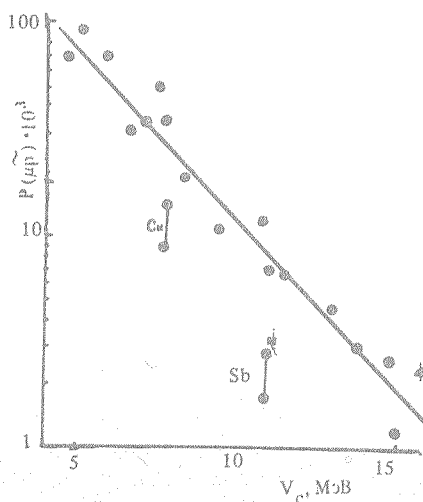


Рис. 1. Зависимость $P(\mu, \tilde{p})$ от высоты кулоновского барьера ядра V_c .

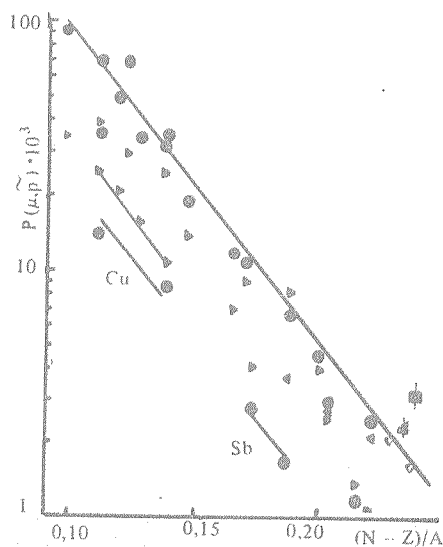


Рис. 2. Зависимость $P(\mu, \tilde{p})$ от параметра асимметрии $(N-Z)/A$. Эксперимент: \bullet – /2,4/; \blacksquare \blacktriangle – /1,8/; расчет: \blacktriangleright – /2/; \blacktriangleleft – /4/; \blacktriangledown – настоящая работа.

Фотопластинки, загруженные ураном, облучались в пучке мюонов Швейцарского института ядерных исследований /1,8/. Среди $4,4 \cdot 10^5$ случаев деления ядер ^{238}U было найдено 99 мгновенных делений, в которых из конца одного из осколков в результате поглощения мюона испускались заряженные частицы (p,d,t, α). Из них в 88 случаях — из конца тяжелого осколка.

Вероятность реакции (μ, \tilde{p}) на один захват мюона тяжелыми осколками оказалась равной $P(\mu, \tilde{p}) = (3,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$. Интересно сравнить эту величину с экспериментальными данными для стабильных ядер (рис. 2), а также с расчетными значениями $P(\mu, \tilde{p})$ для осколков мгновенного деления ядер урана мюонами. Значение $P(\mu, \tilde{p})$, вычисленное для тяжелых осколков, оказалось равным $1,7 \cdot 10^{-3}$.

Видно, что $P(\mu, \tilde{p})$ превышает значения, вытекающие из систематики для стабильных ядер (рис. 2) и расчета. Для более точного определения этого различия необходимо расширить и уточнить экспериментальные данные по $P(\mu, \tilde{p})$ для стабильных и делящихся ядер в основном в области $(N - Z)/A \sim 0,2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беловицкий Г. Е., Петижан К. Письма в ЖЭТФ, 38, 212 (1983).
2. Lifshitz M, Singer P. Phys. Rev., C22, 2135 (1980).
3. Батусов Ю. А., Эрамжан Р. А. ЭЧАЯ, 8, 229 (1977).
4. Wyttenbach A. et al. Nucl. Phys., A294, 278 (1978).
5. Левковский В. Н. Я. Ф., 18, 70 (1973).
6. Бычков В. М., Пашенко А. Б., Пляскин В. И. Нейтронная физика (Материалы 5-ой Всесоюзной конференции по нейтронной физике, г. Киев, 15-19 сентября 1980 г.), ч. 3, 291, 1980.
7. Kozłowski T., Zgliniski A. Nucl. Phys., A305, 368 (1978).
8. Беловицкий Г. Е. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 10, 8 (1985).

Поступила в редакцию 11 мая 1986 г.