

## ПЕРЕЗАРЯДКА МЕЗОАТОМОВ ДЕЙТЕРИЯ НА ${}^3\text{He}$ И ${}^4\text{He}$

*Д.В.Балин, А.А.Воробьев, Ан.А.Воробьев,  
Ю.К.Залите, А.А.Марков, В.И.Медведев,  
Е.М.Маев, Г.Г.Семенчук, Ю.В.Смиренин*

Измерена скорость перезарядки мезоатомов дейтерия на ядрах  ${}^3\text{He}$  и  ${}^4\text{He}$ :  $\lambda_{d^3\text{He}} = (1,27 \pm 0,11) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ ,  $\lambda_{d^4\text{He}} = (3,68 \pm 0,18) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ . Полученные результаты подтверждают молекулярный механизм перезарядки.

Одним из процессов, приводящим к уменьшению числа актов мезокатализа ядерного синтеза, является необратимая перезарядка мезоатомов водорода на ядрах гелия –  ${}^3\text{He}$  и  ${}^4\text{He}$ , которые всегда будут накапливаться в дейтерий-тритиевой смеси в результате реакций  $d\mu$ - и  $d\mu$ -катализа, а также в результате  $\beta$ -распада трития.

До недавнего времени оценки скорости этого процесса делались на основе модели прямой перезарядки<sup>1</sup>. Предсказываемая этой моделью скорость перезарядки на гелии очень мала  $\sim 10^6 \text{ с}^{-1}$ , что примерно на четыре порядка меньше скорости перезарядки на элементы с  $z > 4$ . Это объясняется отсутствием пересечений молекулярных термов у систем, участвующих в процессе перезарядки. Ситуация изменилась после 1981 года, когда в работе<sup>2</sup> был рассмотрен новый (молекулярный) механизм перезарядки на гелии, идущий по схеме  $\text{H}\mu + \text{He}^{++} \rightarrow [(\text{H}\mu\text{He})^*]^{++} \rightarrow \text{H}^+ + [\text{He}\mu]^+$ , где  $\text{H} \equiv p, d$  или  $t$  (рис. 1). Этот механизм должен был приводить к скоростям в 100 раз более высоким, чем в модели прямой перезарядки.

Обычно скорости перезарядки определялись по уменьшению времени жизни мюонов при добавлении известного количества примесей в водород или дейтерий [ $3 \div 5$ ]. В случае гелия, однако, время жизни захваченных им мюонов мало отличается от времени жизни свободных мюонов, что практически исключало использование такого метода. В этом случае скорость перезарядки определялась методом "тройной смеси", когда в заранее приготовленную смесь (например, водорода и ксенона) добавлялось некоторое количество гелия, что приводило к возрастанию среднего времени жизни мюонов. Таким способом в работе<sup>3</sup> была получена оценка скорости перезарядки мюонов с  $d\mu$ -атомов на гелии:  $\lambda_{d^4\text{He}} \approx (8 \pm 10) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ . Лишь недавно в работе<sup>6</sup> были опубликованы первые достаточно точные данные о перезарядке на гелии  $p\mu$ -атомов:  $\lambda_{p^4\text{He}} = (3,6 \pm 1,0) \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ , в согласии с предсказаниями молекулярного механизма<sup>2</sup>.

В настоящей работе применен новый метод исследования, основанный на регистрации актов  $dd$ -катализа с помощью ионизационной камеры высокого давления, которая служит одновременно мишенью и детектором<sup>7</sup>. Метод основан на измерении временных распределений событий  $dd$ -синтеза, вызванных остановившимся в чувствительном объеме камеры мюоном. Сигнал остановки мюона служил началом отсчета времени. Регистрировались также электроны  $\mu$ -распада. Камера обеспечивала достаточно высокое быстродействие ( $\Delta t \sim 300$  нс), 100%-ная эффективность регистрации заряженных продуктов  $dd$ -синтеза и надежное выделение событий на уровне фона.

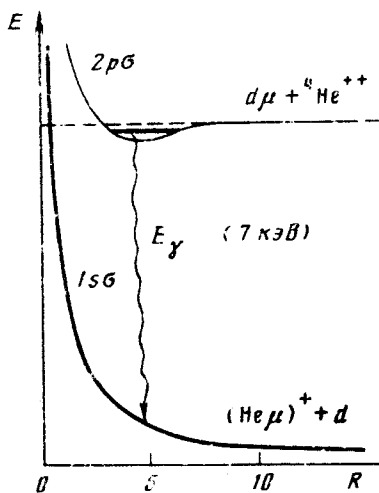


Рис. 1

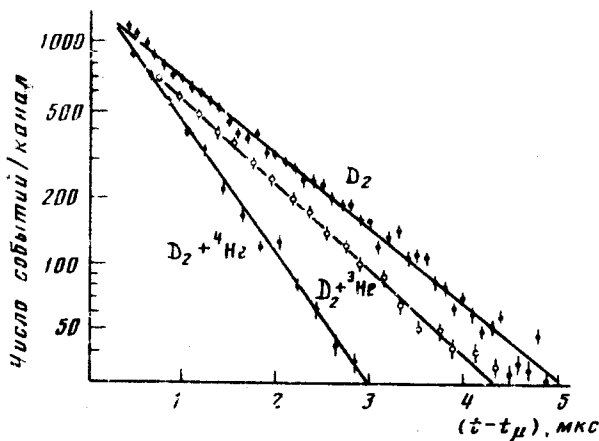


Рис. 2

Рис. 1. Схема молекулярной перезарядки мезомюона водорода на ядрах гелия. Термы  $2p\sigma$  и  $1s\sigma$  соответствуют системам  $d\mu + {}^4\text{He}^{++}$  и  $d + ({}^4\text{He}\mu)^+$  при  $R \rightarrow \infty$ , где  $R$  – расстояние между ядрами в мезомолекулярных единицах

Рис. 2. Временные распределения первых событий синтеза в чистом дейтерии и при добавлении  ${}^3\text{He}$  (1,97%) и  ${}^4\text{He}$  (1,82%)

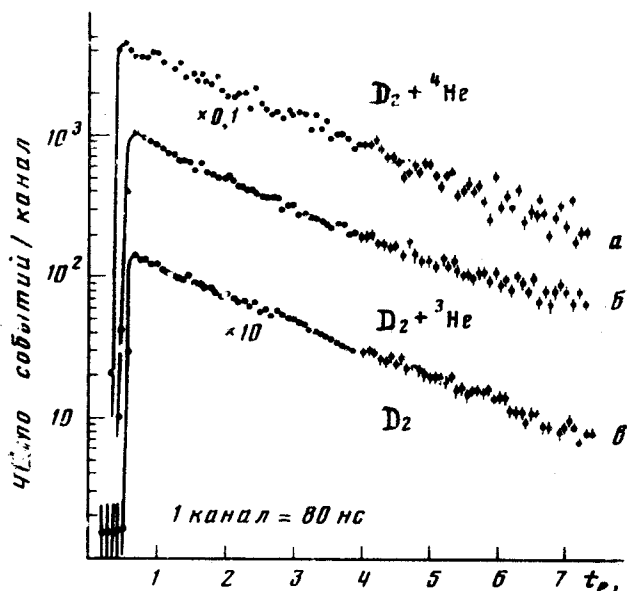


Рис. 3. Временные распределения электронов  $\mu$ -распада. Распределения аппроксимировались выражением  $dN/dt = A + B\exp(-t/\tau)$ . В результате фитирования найдены следующие значения параметра  $\tau$ : а –  $\tau(D_2 + {}^4\text{He}) = 2,179 \pm 0,043$  мкс; б –  $\tau(D_2 + {}^3\text{He}) = 2,176 \pm 0,054$  мкс; в –  $\tau(D_2) = 2,145 \pm 0,041$  мкс

В этих условиях временные распределения первых после остановки мюонов событий  $dd$ -синтеза описываются экспонентой

$$dN/dt \sim \exp\{-(\lambda_0 + \lambda_{dd\mu} + \lambda_{dz})(t - t\mu)\},$$

где:  $\lambda_0$  – скорость распада мюона,  $\lambda_{dd\mu}$  – скорость образования  $dd\mu$ -мезомолекул,  $\lambda_{dz}$  – скорость перезарядки на примесь  $z$ ,  $(t - t\mu)$  – временной интервал между сигналом остановки мюона и первым синтезом. Измерив указанные временные распределения в чистом дейтерии и в смеси дейтерия с известным количеством гелия, можно найти величину  $\lambda_{dHe}$  по разнице показателей экспонент.

Сводка данных по измерению скоростей перезарядки мезоатомов водорода на гелии.

Работа	Измеряемый параметр <sup>1)</sup>	Давление в мишени, атм	Атомарная концентрация гелия, %	Скорость перезарядки, $10^8 \text{c}^{-1}$		
				Эксперимент	Теория	
					1	2
<sup>6</sup> В.М.Быстрицкий и др. (1982)	$\lambda_{p^4He}$	16 ÷ 25	5 ÷ 70	0,36 ± 0,1	0,055	0,44
<sup>9</sup> S.E.Jones et al. (1983)	$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{r^3He} \\ \lambda_{d^3He} \end{array} \right.$	~ 700	~ 4 · 10 <sup>-2</sup>	7 ± 2	–	5,62
		~ 700	~ 4 · 10 <sup>-2</sup>	2 ± 1	0,013	1,48
Настоящая работа	$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{d^3He} \\ \lambda_{d^4He} \end{array} \right.$	76,9	1,97 ± 0,03	1,27 ± 0,11	0,013	1,48
		85,9	1,82 ± 0,02	3,68 ± 0,18	0,01	2,03

<sup>1)</sup> Все скорости перезарядки нормированы на плотность гелия, равную плотности жидкого водорода:  $\rho_0 = 4,25 \cdot 10^{22} \text{ ат/см}^3$ .

Эксперименты по измерению скоростей перезарядки мезоатомов дейтерия на ядрах <sup>3</sup>He и <sup>4</sup>He были выполнены на мезонном канале синхротронного ускорителя ЛИЯФ. Предварительные результаты опубликованы в <sup>8</sup>. Характер полученных временных распределений демонстрируется на рис. 2. Видно, что при добавлении небольшого количества гелия значительно увеличивается показатель экспонент временных распределений продуктов  $dd$ -синтеза. Чтобы избежать влияния примесей, добавленных вместе с гелием, которые могли бы имитировать наблюдаемый эффект, проводилась тщательная очистка газа и его анализ до и после эксперимента. Этот анализ показал, что примесь O<sub>2</sub> и N<sub>2</sub> в рабочей смеси не превышала 3 · 10<sup>-6</sup> объемных долей, что давало вклад в измеряемую величину  $\lambda_{dHe}$  не более 10%.

Дополнительным критерием отсутствия влияния примесей на результаты измерений являются временные спектры электронов  $\mu$ -распада, приведенные на рис. 3. Как видно, полученные значения времен жизни мюонов в исследуемых смесях и чистом дейтерии совпадают. Это исключает интерпретацию наблюдаемых при добавлении гелия изменений в распределении  $dN/dt$  влиянием каких-либо примесей в гелии. Сводка последних результатов измерений процессов перезарядки дана в таблице. В эту таблицу внесены также предварительные результаты группы Лос-Аламоса, использовавшей для измерения скорости перезарядки выход нейтронов  $dt$ -синтеза <sup>9</sup>. Общее хорошее согласие полученных данных предсказаниями модели молекулярного механизма перезарядки <sup>2</sup> позволяет заключить, что этот механизм имеет теперь достаточно надежное экспериментальное подтверждение.

#### Литература

2. Аристов Ю.А., Кравцов А.В., Попов Н.П. и др. ЯФ, 1981, 33, 1066.
3. Placci A., Zavattini E. et al. Nuovo Cim., 1967, 52 A, 1271.
4. Quaranta A.A., Bertin A. et al. Nuovo Cim., 1967, 47B, 92.
5. Bertin A., Bruno M. et al. Phys. Rev., 1973, 7A, 462.
6. Быстрицкий В.И., Желепов В.П. и др. Препринт Р1-82-646, Дубна 1982.
7. Балин Д.В. и др. Препринт ЛИЯФ №964, с. 54, 1984.
8. Balin D. V. et al. Preprint LINP, 895, 1983; Balin D. V. et al. Proc. PANIC Conf. Heidelberg, 1984, v.11, p.L25.
9. Jones S.E., Gaffrey A.J. et al. Phys. Rev. Lett. 1983, 51, 1757.

Институт ядерной физики  
им. Б.П.Константинова  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
19 июля 1985г