

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА $d\mu(n) + t \rightarrow d + t\mu(n)$ НА КИНЕТИКУ ПРОЦЕССОВ МЮОННОГО КАТАЛИЗА В СМЕСИ $D_2 + T_2$

Л.И.Меньшиков, Л.И.Пономарев

Показано, что процесс изотопного обмена $(d\mu)_n + t \rightarrow d + (t\mu)_n$ из возбужденных состояний $n \sim 2 \div 5$ мезоатомов дейтерия заметно меняет оптимальные условия протекания реакций мюонного катализа в смеси дейтерия и трития, найденные ранее без учета этого процесса.

1. При описании кинетики мюонного катализа в смеси дейтерия и трития обычно исходят из того, что отрицательно заряженные мюоны с энергией $E_\mu \sim 3$ кэВ в смеси $D_2 + T_2$ за время $\sim 0,8 \cdot 10^{-12} \rho^{-1}$ с захватываются в высоковозбужденные ($n \gtrsim 14$) состояния мезоатомов $d\mu$ и $t\mu$, затем за время $\sim 0,5 \cdot 10^{-12} \rho^{-1}$ с достигают состояний $n = 6 \div 7$ мезоатомов и, наконец, за время $\sim 1,4 \cdot 10^{-11} \rho^{-1}$ с переходит в основное $1s$ -состояние мезоатомов $d\mu$ и $t\mu$ ^{4,5}. При этом обычно принималось без обсуждений, что их относитель-

ная концентрация равна отношению концентраций дейтерия и трития, т. е. $C_{d\mu} : C_{t\mu} = C_d : C_t^{1,2}$. Последнее утверждение считалось настолько очевидным, что никогда не подвергалось сомнению. Покажем теперь, что процесс квазирезонансной перезарядки ³

$$(d\mu)_n + t \rightarrow d + (t\mu)_n \quad (1)$$

из возбужденных состояний $n \lesssim 5$ $d\mu$ -атомов в те же состояния $t\mu$ -атомов нарушает указанное соотношение, и заметно влияет на последовательность реакций мюонного катализа.

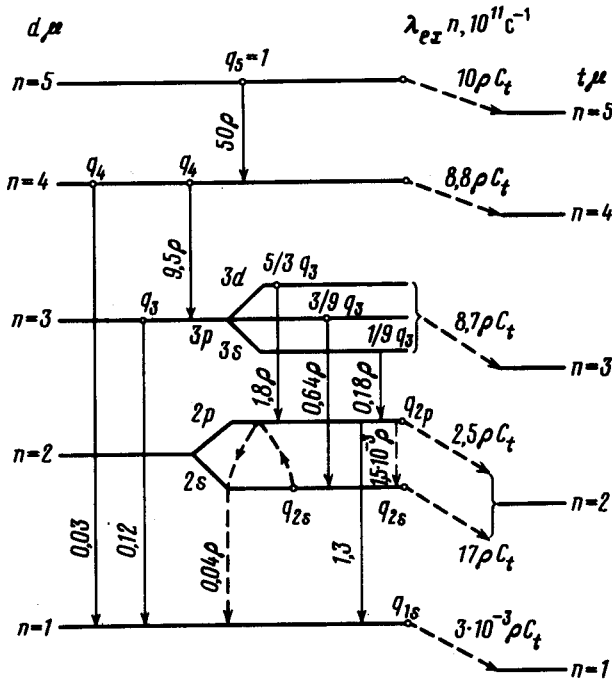


Рис. 1. Схема переходов в мезоатоме $d\mu$. Скорости переходов приведены в единицах 10^{11} c^{-1} и соответствует энергии $d\mu E = 0,05 \text{ эВ}$

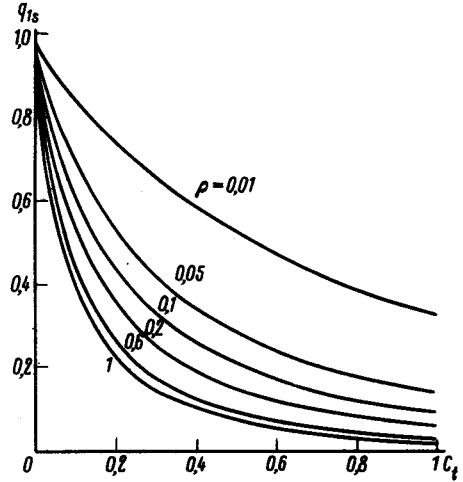


Рис. 2

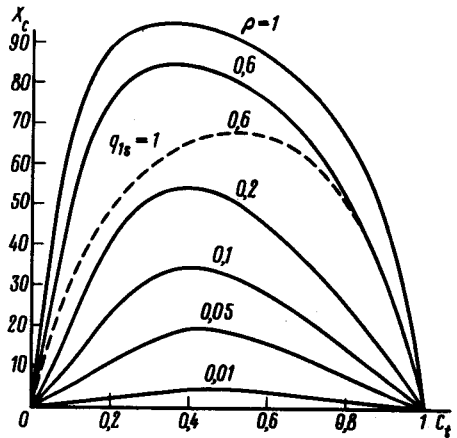


Рис. 3

Рис. 2. Заселенности q_{1s} основного состояния $d\mu$ -атома как функции концентрации трития C_t при различных плотностях $\rho_{D_2 + T_2}$

Рис. 3. Число циклов катализа X_c , осуществляемых одним мюоном в смеси $D_2 + T_2$ при различных ρ и C_t . Для сравнения пунктиром приведена кривая $X_c(C_t)$ при $\rho = 0,6$ $q_{1s} = 1$, т. е. без учета процесса (1)

2. На рис. 1 представлена схема переходов из начального состояния $n = 5$ мезоатома $d\mu$. Скорости $\lambda_{ex}(n)$, 10^{11} c^{-1} изотопного обмена (1) вычислены в работе ³. Скорости $\lambda_{nn'}$, 10^{11} c^{-1} каскадных переходов между состояниями n и n' $d\mu$ -атома вычислены в работах ⁴⁻⁶, скорость $\lambda_{2p, 2s} = 1,5 \cdot 10^{-3} \rho$ перехода $2p \rightarrow 2s$ и скорость $\lambda_{2s, 1s} = 0,04\rho$ индуцированного перехода $2s \rightarrow 2p \rightarrow 1s$ найдены в ^{3, 7}. Отметим, что в отличие от скоростей радиационных переходов $\lambda_{41} = 0,03$, $\lambda_{31} = 0,12$ и $\lambda_{21} = 1,3$, скорости $\lambda_{nn'}$ оже-переходов $\lambda_{54} = 50\rho$, $\lambda_{43} = 9,5\rho$ и $\lambda_{31', 21'}$, пропорциональны плотности ρ смеси поскольку они обусловлены столкновениями возбужденных мезоатомов водорода с атомами водорода. Эти скорости слабо зависят от кинетической энергии мезоатомов в области $0,04 \lesssim$

$\lesssim E \lesssim 1$ эВ. Большие скорости $\lambda_{st} \sim 10^{13} n \rho \text{ с}^{-1}$ ^{3, 4} штарковского перемешивания состояний при таких столкновениях обеспечивают статистическую заселенность $(2l+1/n^2)q_n$ подуровней nl состояния n , где q_n — суммарная заселенность уровня n .

При вычислениях принято $q_5 = 1$, что эквивалентно пренебрежению перезарядкой (1) из состояний $n > 5$, поскольку для таких состояний $\lambda_{nn'} \gg \lambda_{ex}(n)$. Стационарные заселенности q_n вычисляются по формулам ⁵:

$$q_n = \sum_{n' > n} q_{n'} \frac{\lambda_{n'n}}{\lambda_{n'}} \quad , \quad q_5 = 1 \quad (2)$$

$$\lambda_{n'} = \lambda_{ex}(n') + \sum_{n'' < n'} \lambda_{n'n''}$$

На рис. 2 представлены заселенности q_{1s} состояния $1s$ мезоатома $d\mu$ как функции концентрации C_t ядер трития в смеси ($C_d + C_t = 1$) при различных плотностях ρ смеси $D_2 + T_2$. Видно, что они существенно меньше единицы, в противоположность тому, что предполагалось во всех предыдущих расчетах. При $\rho \gtrsim 0,3$ и $C_t \gtrsim 0,3$ заселенность q_{1s} довольно слабо зависит от ρ и C_t .

3. Кинетика процессов мюонного катализа и, в частности, число циклов катализа X_c , осуществляемых одним мюоном в смеси $D_2 + T_2$ по схеме $\mu^- \rightarrow d\mu \rightarrow t\mu \rightarrow dt\mu \rightarrow {}^4\text{He}^+ + n + \mu^-$ зависит от доли $P_{1s} = C_d q_{1s}$ мезоатомов $d\mu$, достигающих $1s$ -состояния в процессе каскада. При концентрации дейтерия C_d и плотностях смеси $\rho \gtrsim 10^{-2}$ ^{1, 2}:

$$X_c^{-1} \approx \omega_s + \frac{\lambda_0}{\lambda_{dt\mu}^\circ \rho C_d} + C_d q_{1s} \frac{\lambda_0 + \frac{\beta}{1+\beta} \omega_d \lambda_{dd\mu}^\circ \rho C_d}{\lambda_0 + \lambda_{dd\mu}^\circ \rho C_d (1 - C_d q_{1s}) + \lambda_{dt\mu}^\circ \rho C_d} + \omega_t \frac{\lambda_{tt\mu}^\circ C_t}{\lambda_{dt\mu}^\circ C_d} \quad (3)$$

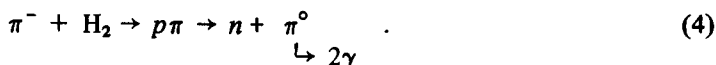
$$\lambda_{dt\mu}^\circ = \lambda_{dt\mu}^{(a)} C_d + \lambda_{dt\mu}^{(b)} C_t$$

$$\lambda_{dd\mu}^\circ = \lambda_{dd\mu}^{(a)} C_d + \lambda_{dd\mu}^{(b)} C_t$$

где $\lambda_0 = 0,46 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ — скорость распада мюона, а значения $\omega_s = 0,9 \cdot 10^{-2}$, $\omega_d = 0,126$; $\omega_t \approx 0,1$; $\beta = 1,4$; $\lambda_{dt\mu}^{(a)} = 7 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$, $\lambda_{dt\mu}^{(b)} = 3 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$, $\lambda_{tt\mu}^\circ = 3 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ взяты из работ ^{1, 8-10}.

На рис. 3 приведены величины X_c как функции C_t при различных ρ с учетом зависимости q_{1s} от ρ и C_t . Для сравнения приведена также функция $X_c(C_t)$ при $q_{1s} = 1$; $\rho = 0,6$. Из рисунка видно, что с учетом процесса (1) значение X_c увеличивается, а максимум кривой $X_c(C_t)$ смещается в область меньших C_t и раслет с увеличением ρ . Отметим, что приведенные кривые не следует рассматривать как окончательные, поскольку при их построении положено $\lambda_{dd\mu}^{(a)} \approx \lambda_{dd\mu}^{(b)} \sim 10^6 \text{ с}^{-1}$, и, кроме того, использованы значения $\lambda_{dt\mu}^{(a)}$ и $\lambda_{dt\mu}^{(b)}$, найденные в работе ¹⁰, на основании измерений X_c при различных C_t по формулам типа (3), но без учета процесса (1), т. е. при $q_{1s} = 1$.

4. Ввиду важности процесса (1) для кинетики мюонного катализа необходимо экспериментальное подтверждение его эффективности. Один из возможных путей — измерение выхода γ -квантов от распада $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ при захвате π^- -мезонов на возбужденные орбиты n мезоатомов



Измеряя с хорошей точностью уменьшение выхода γ -квантов в реакции (4) в смеси $H_2 + D_2$ при увеличении концентрации дейтерия, можно измерить скорости процессов изотопного обмена ¹¹



аналогичного процессу (1) и тем самым проверить корректность расчетов ³.

Авторы благодарны В.С.Мележику за помощь в численных расчетах.

Литература

1. Proceedings of Third Int. Conf. of Emerging Nuclear Energy Systems, 6–9 June, 1983, Atomkernenergie, 1983, 43, 175.
2. Герштейн С.С. и др. ЖЭТФ, 1980, 78, 2009.
3. Меньшиков Л.И., Пономарев Л.И. Препринт ИАЭ-3811/12, 1983.
4. Leon M., Bethe H. Phys. Rev., 1962, 127, 636; Коренман Г.Я. ЯФ, 1980, 32, 916.
5. Маркушин В.Е. ЖЭТФ, 1981, 80, 35.
6. Бухвостов А.П., Попов Н.П. ЖЭТФ, 1982, 82, 23.
7. Mueller R.O. et al. Phys. Rev., 1975, A11, 1175.
8. Быстрицкий В.М. и др. ЖЭТФ, 1979, 76, 460.
9. Balin P.V. et al. Preprint 895, LNPI, 1983.
10. Steven E. Jones et al. Phys. Rev. Lett., 1983, 51, 1157.
11. Петрухин В.И., Прокошкин Ю.Д. ЖЭТФ, 1969, 56, 501.

Институт
атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
28 апреля 1984 г.