

ИССЛЕДОВАНИЕ МЮОННОГО КАТАЛИЗА ЯДЕРНОГО dd -СИНТЕЗА В ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ 51,6 ÷ 93,0 АТМОСФЕР

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

Измерена скорость образования $dd\mu$ -молекул при давлениях дейтерия 51,6; 70,4; 79,6; 91,6; 93,0 атм и температуре 293 К. Определены отношение выходов реакций dd -синтеза и эффективный коэффициент прилипания мюонов.

Мюонный катализ ядерного dd -синтеза характеризуется следующими основными параметрами: скоростью образования $dd\mu$ -молекул $\lambda_{dd\mu}$, отношением выходов реакций синтеза $R = Y(d+d \rightarrow {}^3\text{He} + n)/Y(d+d \rightarrow t+p)$ и эффективным коэффициентом прилипания мюонов $\tilde{\omega}_{dd, {}^3\text{He}}$. Обычно скорость образования $dd\mu$ -молекул приводят к плотности жидкого водорода:

$$\lambda_{dd\mu}^0 = \lambda_{dd\mu} \rho_0 / \rho_D$$

где ρ_D — плотность дейтерия в условиях опыта, $\rho_0 = 4,25 \cdot 10^{22}$ атом/см³ — плотность жидкого водорода. Эффективный коэффициент прилипания мюонов $\tilde{\omega}_{dd, {}^3\text{He}}$ определяется согласно выражению

$$\tilde{\omega}_{dd, {}^3\text{He}} = \omega_{dd, {}^3\text{He}} \gamma_{{}^3\text{He}},$$

где $\omega_{dd, {}^3\text{He}}$ — вероятность прилипания мюона к образовавшемуся ядру ${}^3\text{He}$, $\gamma_{{}^3\text{He}}$ — вероятность удержания мюона в процессе торможения иона (${}^3\text{He} \mu$)⁺. Общий эффективный коэффициент прилипания мюонов $\tilde{\omega}_{dd}$ вычисляется по формуле

$$\tilde{\omega}_{dd} = \tilde{\omega}_{dd, {}^3\text{He}} R / (R + 1).$$

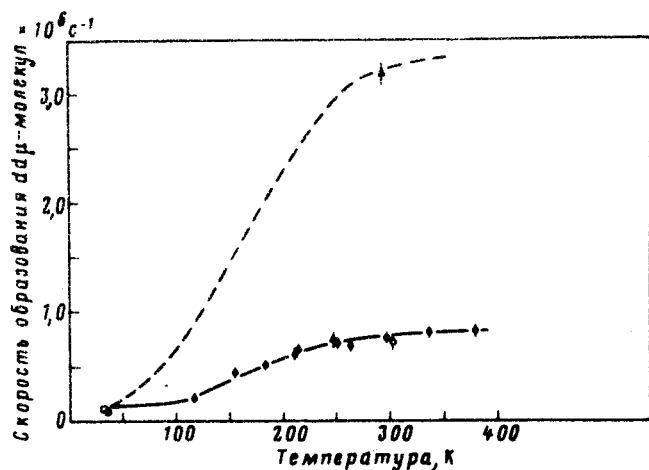
При этом мы считаем, что $\tilde{\omega}_{dd, t} = 0$.

Для исследования мюонного катализа ядерного dd -синтеза нами был разработан ^{2, 3} новый экспериментальный метод, основанный на использовании наполненной дейтерием импульсной ионизационной камеры высокого давления в качестве детектора заряженных продуктов синтеза. Это позволило в условиях 4π -геометрии с высокой эффективностью ($\sim 100\%$) регистрировать, наряду с остановкой мюона, до трех последовательных актов dd -синтеза. При этом измерялось время появления каждого сигнала, его амплитуда и длительность. Анализ сигналов, вызванных остановкой мюона, позволил провести эффективный отбор полезных событий. После отбора примесь фоновых событий не превышала 0,3 %.

Анализ временных распределений сигналов синтеза дал возможность определить величину $\lambda_{dd\mu}$. Было разработано несколько независимых способов определения этой величины, которые дали согласующиеся между собой результаты. Важно отметить, что использованные нами методы определения $\lambda_{dd\mu}$ не зависят от чистоты газа. Из анализа амплитудных спектров можно было определить отношение выходов R изотопически симметричных каналов синтеза и величину эффективного коэффициента прилипания $\tilde{\omega}_{dd, {}^3\text{He}}$ ⁴. Таким образом в одном эксперименте были определены все три основных параметра $d\text{-}\mu\text{-}d$ катализа. Заметим, что во всех предыдущих исследованиях $d\text{-}\mu\text{-}d$ катализа фактически измерялась лишь величина $\lambda_{dd\mu}$. Подробное описание использованного нами экспериментального метода приведено в работе ⁵.

Результаты измерения параметров $d\text{-}\mu\text{-}d$ катализа

Давление, атм	$\lambda_{dd\mu}^0, 10^6 \text{ c}^{-1}$	R	$\tilde{\omega}_{dd, {}^3\text{He}}$	$\tilde{\omega}_{dd}$
51,6	$2,4 \pm 0,6$	—	—	—
70,4	$2,86 \pm 0,11$	$1,32 \pm 0,05$	$0,125 \pm 0,005$	$0,071 \pm 0,003$
79,6	$2,74 \pm 0,14$	$1,52 \pm 0,11$	$0,116 \pm 0,008$	$0,070 \pm 0,005$
91,6	$2,76 \pm 0,08$	$1,39 \pm 0,04$	$0,126 \pm 0,004$	$0,073 \pm 0,003$
93,0	$2,84 \pm 0,10$	$1,47 \pm 0,06$	$0,111 \pm 0,006$	$0,066 \pm 0,004$
Среднее значение	—	$1,39 \pm 0,03$	$0,122 \pm 0,003$	$0,071 \pm 0,002$



Температурная зависимость скорости образования $dd\mu$ -молекул, приведенная к плотности жидкого дейтерия $\rho_D^0 = 4,93 \cdot 10^{22} \text{ ат/см}^3$. Пунктир — результат перенормировки резонансной кривой ¹⁰ на полученное нами значение $\lambda_{dd\mu}$. Заметим, что данные работы ¹⁰ относительны и нормированы на результаты работ ⁸ и ⁹. ■ — Fetkovich et al. ⁶, □ — Doede ⁷, Δ — Джелепов и др. ⁸, ○ — Быстрицкий и др. ⁹, ● — Быстрицкий и др. ¹⁰, ▲ — данная работа

Наши измерения были выполнены при давлениях дейтерия 51,6; 70,4; 79,6; 91,6; 93,0 атм и температуре 293 К. Наибольшая статистика была набрана при давлении 91,6 атм. В этом случае было зарегистрировано 18800 событий синтеза. Результаты анализа экспериментальных данных приведены в таблице. Как видно из этой таблицы, величина $\lambda_{dd\mu}^0$ в исследованном диапазоне практически не зависит от давления. Поскольку величины R , $\tilde{\omega}_{dd, {}^3\text{He}}$ и $\tilde{\omega}_{dd}$ не должны зависеть от давления, в таблице представлены также их усредненные значения.

На рисунке приведены результаты проведенных ранее экспериментальных исследований температурной зависимости скорости образования $dd\mu$ -молекул $6-10$. Там же представлено значение $\lambda_{dd\mu}^0$, полученное нами при давлении 91,6 атм. Это значение в четыре раза отличается от результатов дубненской группы $8, 9$ и свидетельствует о еще более сильно выраженной резонансной зависимости скорости образования $dd\mu$ -молекул. Расхождение между нашими и дубненскими данными нельзя объяснить тем, что измерения в Дубне выполнены при несколько меньших давлениях ($P \lesssim 40$ атм) $8, 9$, поскольку, как показано в данной работе, величина $\lambda_{dd\mu}^0$ практически не зависит от давления.

Найденная нами величина эффективного коэффициента прилипания мюонов $\tilde{\omega}_{dd, {}^3\text{He}} = 0,122 \pm 0,003$ несколько ниже расчетного значения 0,147, полученного в работе 1 . Аналогичная ситуация может иметь место и в случае мюонного катализа dt -синтеза. Это имело бы практическое значение, так как означало бы, что предельное число актов dt -синтеза, вызванных одним мюоном, больше теоретически ожидаемой величины, равной 110 1 . Что же касается обнаруженного в данной работе отклонения от изотопической симметрии в реакции dd -синтеза ($R = 1,39 \pm 0,03$), то этот эффект не имеет пока надежного теоретического объяснения. Его можно связать с аномалиями, наблюдаемыми в P -волне dd -рассеяния в области низких энергий 11 , так как специфика $dd\mu$ -системы такова, что синтез, в основном, идет в P -состоянии.

Литература

1. Герштейн С.С., Петров Ю.В., Пономарев Л.И., Попов Н.П., Пресняков Л.П., Сомов Л.Н. ЖЭТФ, 1981, 80, 1690.
2. Balin D. V., Plyin A. I., et al. Preprint LNPI-895, Leningrad, 1983.
3. Balin D. V., Maev E. M. et al. Phys. Lett., 1984, 141B, 173.
4. Балин Д.В., Воробьев А.А. и др. Препринт ЛИЯФ-715, Ленинград, 1981.
5. Балин Д.В., Воробьев А.А. и др. Препринт ЛИЯФ-964, Ленинград, 1984.
6. Fetkovich J., Fields T., Yodh G., Derrick M. Phys. Rev. Lett., 1960, 4, 570.
7. Doede J. Phys. Rev., 1963, 132, 1782.
8. Джелепов В.П., Еромолов П.Ф., Москалев В.И., Фильченков В.В. ЖЭТФ, 1966, 50, 1235.
9. Быстрицкий В.М., Джелепов В.П. и др. ЖЭТФ, 1974, 66, 61.
10. Быстрицкий В.М., Джелепов В.П. и др. ЖЭТФ, 1979, 76, 460.
11. Богданова Л.Н., Маркушин В.Е., Мележик В.С., Пономарев Л.И. Препринт ОИЯИ, Р4-82-215, Дубна, 1982.