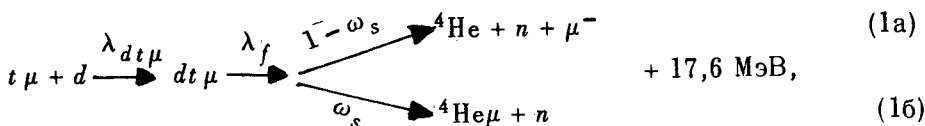


## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЮОННОГО КАТАЛИЗА РЕАКЦИИ СИНТЕЗА ЯДЕР ДЕЙТЕРИЯ И ТРИТИЯ

*В.М.Быстрицкий, В.П.Джеленов, З.В.Ершова<sup>1)</sup>,  
В.Г.Зинов, В.К.Капышев<sup>1)</sup>, С.М.Мухамет-Галеева<sup>1)</sup>,  
В.С.Надеждин, Л.А.Ривкис<sup>1)</sup>, А.И.Руденко,  
В.И.Сатаров, Н.В.Сергеева, Л.Н.Сомов,  
В.А.Столупин, В.В.Фильченков*

На мюонном пучке синхроциклотрона 680 МэВ ОИЯИ проведены измерения выхода нейтронов из реакции  $dt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + n + \mu^- + 17,6 \text{ МэВ}$ , вызываемой отрицательными мюонами в газовой смеси  $\text{D}_2 + \text{T}_2$ . На основании этих данных получено значение скорости перехвата мюона от дейтерия к тритию  $\lambda_{dt} = (2,7 \pm 0,9) \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$  и нижняя граница для скорости образования  $dt\mu$ -молекул  $\lambda_{dt\mu} > 10^8 \text{ сек}^{-1}$ .

1. Процесс синтеза ядер дейтерия и трития из состояния мюонной молекулы  $dt\mu$  (мюонный катализ реакции синтеза  $d + t$ ) может быть записан следующим образом



где  $\lambda_{dt\mu}$  — скорость образования молекул  $dt\mu$ ,  $\lambda_f$  — скорость реакции синтеза,  $\omega_s$  — коэффициент "прилипания" мюона к ядру  ${}^4\text{He}$ .

До настоящего времени процесс (1) экспериментально не изучался. Теоретические значения [1, 2] величины  $\lambda_{dt\mu}$ , полученные до 1977 г., были аномально малы:  $\lambda_{dt\mu} \approx 3 \cdot 10^4 \text{ сек}^{-1}$ . После того, как было установлено [3] существование слабосвязанного состояния в системе  $dt\mu$ , были выполнены новые расчеты [3] величины  $\lambda_{dt\mu}$ , основанные на предположении о существовании резонансного механизма [4] образования мюонных молекул. Экспериментально существование такого механизма было доказано при изучении процесса образования молекул  $dd\mu$  [5, 6]. Найденные в этих работах значения скорости образования  $dd\mu$ -молекул ( $\lambda_{dd\mu}$ ) хорошо согласуются с результатами теоретических вычислений [3].

<sup>1)</sup> Всесоюзный научно-исследовательский институт неорганических материалов, Москва.

Существенно, что полученное в работе [3] значение  $\lambda_{dt\mu} \approx 10^8 \text{ сек}^{-1}$  более чем на два порядка превышает скорость распада свободного мюона  $\lambda_0 = 4,55 \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1}$ . Это означает, что в смеси  $D_2 + T_2$  один мюон может последовательно вызвать до ста реакций (1а) (с учетом малости величины  $\omega_s \approx 1\%$ ) с образованием большого количества быстрых нейтронов [7]. Очевидно, что экспериментальное определение величины  $\lambda_{dt\mu}$  представляет большой интерес [7, 8]. Это совершенно необходимо сделать также, если пытаться серьезно исследовать вопрос о какой-либо возможности использования явления мю-катализа реакции  $d + t$  для энергетики [9].

Целью настоящей работы явилось измерение как скорости образования  $dt\mu$ -молекулы ( $\lambda_{dt\mu}$ ), так и скорости перехвата мюона с дейтрона на тритон ( $\lambda_{dt}$ ).

2. Для определения величин  $\lambda_{dt\mu}$  и  $\lambda_{dt}$  были измерены абсолютный выход ( $\eta_n$ ) и временное распределение ( $d\eta_n/dt$ ) нейтронов с энергией 14,1 МэВ от реакции (1). Если процесс (1) происходит в газовой смеси  $D_2 + T_2$ , то выражения для  $\eta_n$  и  $d\eta_n/dt$  могут быть записаны следующим образом [10]:

$$\eta_n = \frac{(\lambda_0 + \lambda_{dt}\phi) \lambda_{dt\mu} \phi C_d C_t}{\lambda^2 (\lambda_0 + \lambda_{dt}\phi C_t + \lambda_{dt\mu} \phi C_d^2)}, \quad (2)$$

$$\frac{d\eta_n}{dt} = \frac{\lambda_{dt\mu} C_d C_t \phi}{\lambda_{dt} C_t + \lambda_{dt\mu} C_d^2} \{ \lambda_{dt} e^{-\lambda_0 t} + C_d (\lambda_{dt\mu} C_d - \lambda_{dt}) e^{-\lambda_1 t} \}, \quad (3)$$

$$\lambda_1 = \lambda_0 + \lambda_{dt\mu} C_d^2 \phi + \lambda_{dt} C_t \phi,$$

где  $\lambda_{dt\mu}$  и  $\lambda_{dt}$  — скорости образования молекул  $dt\mu$  и изотопного обмена  $d\mu + t \rightarrow t\mu + d$ : приведенные к плотности жидкого водорода  $n_0 = 4,22 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ;  $C_d$  и  $C_t$  — атомные концентрации дейтерия и трития ( $C_d + C_t = 1$ );  $\phi$  — отношение плотности газовой смеси  $D_2 + T_2$  к величине  $n_0$ . Величины  $\lambda_{dt\mu}$  и  $\lambda_{dt}$  были найдены путем сравнения экспериментальных значений  $\eta_n$  и  $d\eta_n/dt$  с выражениями (2) и (3).

3. Эксперимент выполнен на мюонном пучке синхроциклотрона 680 МэВ ОИЯИ. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Мюоны после прохождения мониторных счетчиков 1 — 3 тормозились замедлителем (6), регистрировались счетчиком 4 (сцинтиллятор из  $CsJ(Tl)$ ) и попадали в газовую мишень (8). Мишень заполнялась смесью дейтерия и трития, очищенной от примесей других газов на уровне  $10^{-7}$  объемных долей. Нейтроны из реакции (1а) регистрировались с помощью четырех  $N$ -детекторов (сцинтиллятор NE-213) с использованием разделения нейтронов и гамма-квантов по форме сцинтилляционного импульса. Во-

семь расположенных попарно  $E$ -детекторов (пластический сцинтиллятор) были предназначены для регистрации электронов от распада мюонов, остановившихся в газе.

Основная идея методики измерений заключалась в последовательной регистрации в интервале времени  $0 - 10$  мксек после остановки мюона сначала от нейтронного детектора и затем — от любой пары электронных детекторов ("задержанные совпадения" нейтрон-электрон). Это позволило надежно идентифицировать изучаемый процесс (1), в котором нейтрон из реакции синтеза  $d + t$  сопровождается электроном от последующего распада мюона, и существенно подавить фон, связанный с остановками мюонов в стенках мишени.

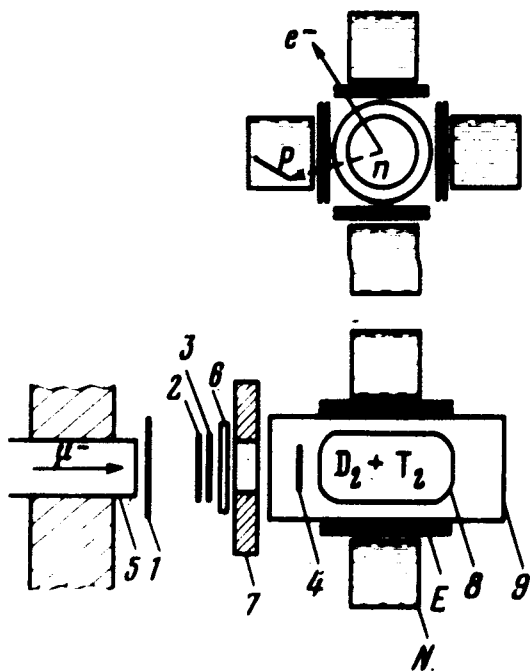


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — 3 — мониторные счетчики с пластическим сцинтиллятором, 4 — счетчик со сцинтиллятором из CsJ (Tl); 5, 7 — коллиматор; 6 — замедлитель; 8 — газовая мишень; 9 — вакуумный кожух;  $N$  — детекторы нейтронов,  $E$  — детекторы электронов

В ходе эксперимента были проведены экспозиции при различных давлениях смеси  $D_2 + T_2$  в мишени, концентрациях трития и температурах. Условия опытов приведены в таблице.

### Условия опытов

Экспозиции	1 — 4	5	6	7	3	9 — 13	14
Давление газа (при $T = 293K$ ), атм	21	10,5	21	21	0	6,6	66,2
Содержание трития, %	3,0	3,0	1,6	0	—	7,8	0,81
Температура мишени, °K	293 — 613	293	293	293	293	93 — 293	93

Экспозиция 7 (дейтерий) и 8 (вакуум) были проведены с целью определения фона нейтронов и электронов.

В каждой экспозиции проводилось измерение временных спектров событий, зарегистрированных  $E$ - и  $N$ -детекторами, а также амплитудных распределений для импульсов от нейтронных детекторов. В качестве примера на рис. 2 приведено двумерное амплитудное распределение, полученное в экспозиции 14 для одного из нейтронных детекторов.

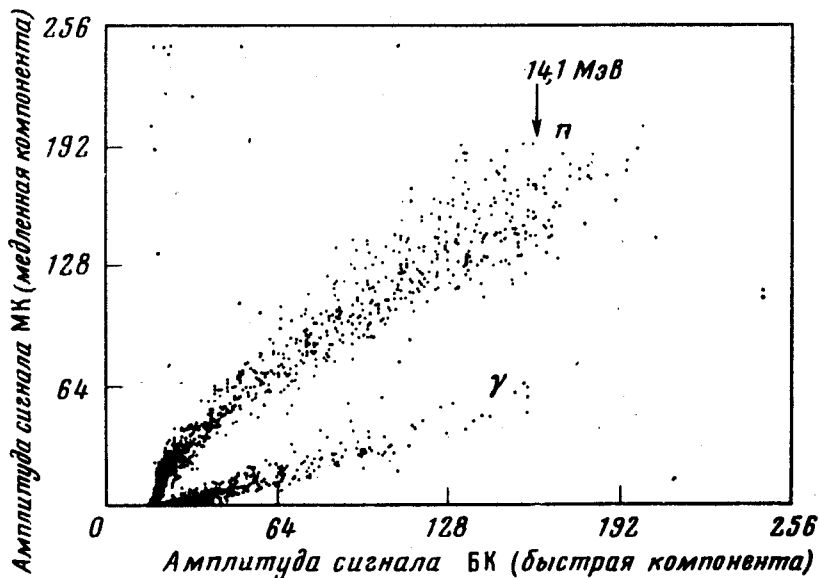


Рис. 2. Двухмерное амплитудное распределение событий, зарегистрированное нейтронным детектором в одной из экспозиций

4. В настоящее время выполнена только предварительная обработка экспериментальных данных. При этом для значения скорости захвата мюона с дейтрона на тритон получено значение

$$\lambda_{dt} = (2,7 \pm 0,9) \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1},$$

а для скорости образования  $dt \mu$ -молекул определена нижняя граница:  $\lambda_{dt\mu} > 10^8 \text{ сек}^{-1}$  на уровне 90% достоверности.

Полученное значение  $\lambda_{dt}$  находится в хорошем согласии с результатами теоретических вычислений [11]. Найденная нижняя граница скорости образования  $dt \mu$ -молекул согласуется с теоретическим значением  $\lambda_{dt\mu} \approx 10^8 \text{ сек}^{-1}$ , вычисленным [3] в предположении существования резонансного механизма образования  $dt \mu$ -молекул. Согласно этому механизму должна существовать резкая зависимость скорости  $\lambda_{dt\mu}$  от температуры смеси  $D_2 + T_2$ , что должно проявляться в изменении выхода нейтронов из реакции (1а) с температурой. Однако наблюдаемый на опыте выход нейтронов ( $\eta_n$ ) в пределах погрешности измерений ( $\lesssim 10\%$ ) не

зависит от температуры газа. Этот факт можно объяснить тем, что величина  $\lambda_{dt\mu}$  во всем исследованном нами интервале температур во много раз превышает скорость распада свободного мюона  $\lambda_0$ , и поэтому изменение  $\lambda_{dt\mu}$  в широких пределах не изменяет величину  $\eta_n$  (см. формулу (2)).

Другая возможная интерпретация этого факта состоит в том, что время термализации  $t\mu$ - атома превышает время образования  $dt\mu$ -молекул, поэтому он не успевает достигнуть тех малых энергий, при которых скорость образования  $dt\mu$ -молекул согласно резонансному механизму должна резко уменьшаться.

В заключение авторы выражают благодарность А.А.Бочвару и А.С.Никифорову за содействие в проведении этой работы, С.С.Герштейну и Л.И.Пономареву за многочисленные плодотворные дискуссии по проблеме мю-катализа. П.Ф.Ермолову, указавшему на важность учета процесса термализации  $t\mu$ -атомов; А.Т.Василенко и В.М.Романову — за помощь в проектировании установки; Г.М.Осетинскому и А.И.Филиппову за обсуждение вопросов, связанных с разработкой схемы установки с тритиевой мишенью; А.А.Борисовой и Л.Н.Старшине за помощь в работе.

Объединенный  
институт ядерных исследований

Поступила в редакцию  
6 января 1980 г.

### Литература

- [1] Я.Б.Зельдович, С.С.Герштейн. УФН, 71, 581, 1960; В.Б.Беляев и др. ЖЭТФ, 37, 1652, 1959.
- [2] Л.И.Пономарев, М.П.Файфман. ЖЭТФ, 71, 1689, 1976.
- [3] С.И.Виницкий и др. ЖЭТФ, 74, 849, 1978.
- [4] Э.А.Весман. Письма в ЖЭТФ, 5, 113, 1967.
- [5] В.П.Джелепов и др. Труды XII Международной конференции по физике высоких энергий, Дубна, 1964 г. В.П.Джелепов и др. ЖЭТФ, 50, 1235, 1966; В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 66, 61, 1974.
- [6] В.М.Быстрицкий и др. Труды Международного симпозиума по проблемам мезонной химии и мезомолекулярных процессов в веществе, Дубна, 1977; ЖЭТФ, 76, 460, 1979.
- [7] S.S.Gershtein, L.I.Ponomarev. Phys. Lett., 72B, 80, 1977.
- [8] L.I.Ponomarev. Proc. of the VII Int. Conf. on High Energy Physics and Nuclear Structure, Zurich, 1977.
- [9] Ю.В.Петров. Труды XIV школы ЛИЯФ АН СССР, Л., 1979.
- [10] С.С.Герштейн и др. Препринт ОИЯИ, P4-11729, Дубна, 1978.
- [11] L.I.Ponomarev. Proc. of the VI Int. Conference on Atomic Physics (p. 182) Riga 1978, Zinante-Riga USSR, Plenum Press, New York and London.