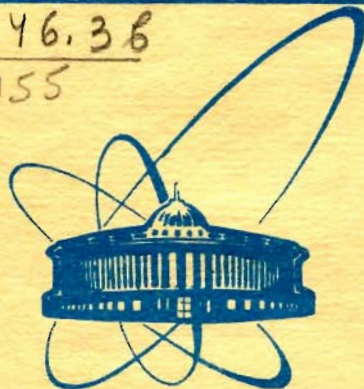


12696

СЗ 46.36
Б-955



сообщения
Объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

3931/2-79

1/x-79

Д1 - 12696

В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, З.В.Ершова,
В.Г.Зинов, В.К.Капышев, С.М.Мухамет-Галеева,
В.С.Надеждин, Л.А.Ривкис, А.И.Руденко,
В.И.Сатаров, Н.В.Сергеева, Л.Н.Сомов,
В.А.Столупин, В.В.Фильченков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ
И ИССЛЕДОВАНИЕ МЮОННОГО КАТАЛИЗА
ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ СИНТЕЗА (d + t)

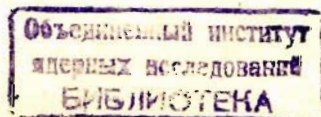
1979

Д1 - 12696

В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, З.В.Ершова *,
В.Г.Зинов, В.К.Капышев *, С.М.Мухамет-Галеева *,
В.С.Надеждин, Л.А.Ривкис *, А.И.Руденко,
В.И.Сатаров, Н.В.Сергеева, Л.Н.Сомов,
В.А.Столупин, В.В.Фильченков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ
И ИССЛЕДОВАНИЕ МЮОННОГО КАТАЛИЗА
ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ СИНТЕЗА (d + t)

* Всесоюзный научно-исследовательский институт неорганических материалов, Москва.



Быстрицкий В.М. и др.

Д1 - 12696

Экспериментальное обнаружение и исследование мюонного катализа ядерной реакции синтеза (d+t)

В опытах с газовой мишенью, заполнявшейся до различных давлений очищенными от примесей дейтерием и тритием, на пучке мюонов синхротрона ОИЯИ измерены выходы и временные распределения нейтронов от реакции синтеза в мезомолекуле $dt\mu$. Опыты выполнены при нескольких концентрациях трития в интервале температур смеси от 93 до 613°K. На основании этих данных определена нижняя граница величины скорости образования $dt\mu$ -молекул $\lambda_{dt\mu} > 10^8$ 1/сек и скорость перехвата мюона от дейтерия к тритию $\lambda_{dt} = (2,7 \pm 0,9) \cdot 10^8$ 1/сек. Найденная нижняя граница величины скорости образования $dt\mu$ -молекулы подтверждает существование резонансного по энергии $t\mu$ -атома механизма образования этой молекулы, предсказываемого теорией. Значение скорости перехвата λ_{dt} также хорошо согласуется с теоретическим значением.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Bystritsky V.M. et al.

Д1 - 12696

Experimental Detection and Investigation of the Muon Catalyzed (d+t) Fusion Process

On the muon beam of the JINR synchrocyclotron the yield and time distribution of neutrons from fusion reaction in $dt\mu$ mesomolecule were measured in the experiments with a gaseous target filled at different pressures with purified deuterium and tritium. The experiments were set up at several tritium concentrations in the range of mixture temperatures from 93° to 613°K. On the basis of the obtained data the low limit of the $dt\mu$ molecule formation rate $\lambda_{dt\mu} > 10^8$ 1/sec and the rate of muon transfer from deuterium to tritium $\lambda_{dt} = (2.7 \pm 0.9) \cdot 10^8$ 1/sec were defined.

The defined low limit of $dt\mu$ -molecule formation rate confirms the existence, over $t\mu$ atomic energy, of a theoretically predicted resonance mechanism in the formation of this molecule. The value of transfer rate λ_{dt} is likewise in good agreement with the theoretical value.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Исследование мю-атомных и мю-молекулярных процессов, а также катализа отрицательными мюонами ядерных реакций синтеза в "холодном" водороде представляет самостоятельный раздел физики мюонов. К настоящему моменту выполнен большой цикл экспериментальных и теоретических работ^{/1/}, посвященных изучению характеристик мезомолекулярных процессов в чистом водороде, дейтерии и их смесях.

Теоретически предсказано^{/2,3/} и экспериментально обнаружено^{/4,5/} новое явление - резонансное образование $dd\mu$ -молекул. Резонанс связан с существованием у $dd\mu$ -молекулы слабосвязанного уровня. Недавно Л.И.Пономаревым и др.^{/3/} в Дубне расчетным путем обнаружен слабосвязанный уровень и у $dt\mu$ -молекулы, существование которого /по аналогии с $dd\mu$ -молекулой/ должно приводить к резонансному образованию молекул $dt\mu$. Вычисленное в работе^{/3/} значение скорости образования $dt\mu$ -молекул $\lambda_{dt\mu} = 10^8$ с⁻¹ более чем в 100 раз превышает измеренное^{/4,5/} значение скорости образования $dd\mu$ -молекул. Указанная величина скорости образования молекул $dt\mu$ существенно превышает оценки, сделанные для нее ранее без учета резонансного механизма^{/6/}, и поэтому ее экспериментальное определение представляет несомненный 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, так и скорости перехвата мюона с дейтрона на тритон.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

а/ Метод измерения

Определение скорости перехвата мюона с дейтроном на тритон и скорости образования молекулы $dt\mu$ было основано на измерении абсолютного выхода и временного распределения нейтронов с энергией 14,1 МэВ от реакции



Последовательность основных процессов, происходящих после остановки мюона в смеси D_2+T_2 , схематически представлена на рис. 1.

Выход η_n и временное распределение нейтронов $d\eta_n/dt$ от реакции /1/ можно записать следующим образом:

$$\frac{1}{\eta_n} = \frac{\lambda_0}{\lambda_{dt\mu} C_d \phi} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{dt} \phi} \frac{C_d}{C_t} + \omega_s \quad /2/$$

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

/3/ *

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

где λ_0 - скорость распада мюона; $\lambda_{dt\mu}$ и λ_{dt} - соответственно скорость образования $dt\mu$ -молекул и скорость изотопного обмена $d\mu+t \rightarrow t\mu+d$, приведенные к плотности жидкого водорода $/n_0 = 4,22 \cdot 10^{22} \text{ 1/см}^3 /$; ϕ - отношение плотности газовой

смеси D_2+T_2 к плотности жидкого водорода; $\lambda_{dd\mu}$ - скорость образования молекул $dd\mu$, приведенная к плотности жидкого водорода; C_d и C_t - атомарные концентрации дейтерия и трития; ω_d и ω_s - коэффициенты прилипания мюона к гелию-3 и гелию-4 соответственно.

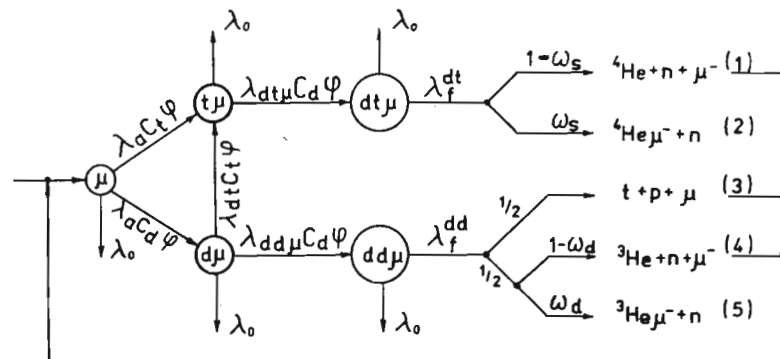


Рис.1. Схема основных процессов, происходящих после остановки мюона в смеси D_2+T_2 .

б/ Постановка опыта

Упрощенная схема установки приведена на рис. 2. В нее входят следующие основные узлы:

- Мониторные счетчики мюонного пучка 1, 2, 3 / пластические сцинтилляторы размерами 300x300x10; 150x150x10; 150x150x10 мм³ соответственно/ и счетчик 4 /кристалл CsJ(Tl) $\phi=100$ мм и толщиной 1 мм/.

- Газовая мишень 8, представляющая собой сосуд из нержавеющей стали с толщиной стенок 3 мм, диаметром 130 мм и длиной 250 мм. Мишень рассчитана на рабочее давление газа 55 атм и диапазон температурных изменений от 76°K до 850°K.

- Четыре детектора N для регистрации нейтронов с жидким сцинтиллятором NE-213 /диаметр кюветы - 100 мм и высота -

* Выражение /3/ справедливо для значений $t > \lambda_f^{-1}, (\lambda_a \phi)^{-1}$, где $\lambda_f \sim 10^{12} \text{ с}^{-1}$ - скорость ядерной реакции $d+t \rightarrow {}^4\text{He} + n$ в мезомолекуле $dt\mu$, а $\lambda_a \sim 10^{10} \text{ с}^{-1}$ - скорость захвата μ^- -мезона на 1s-орбиту мезоатомов $d\mu$ и $t\mu$ при $\phi=1$.

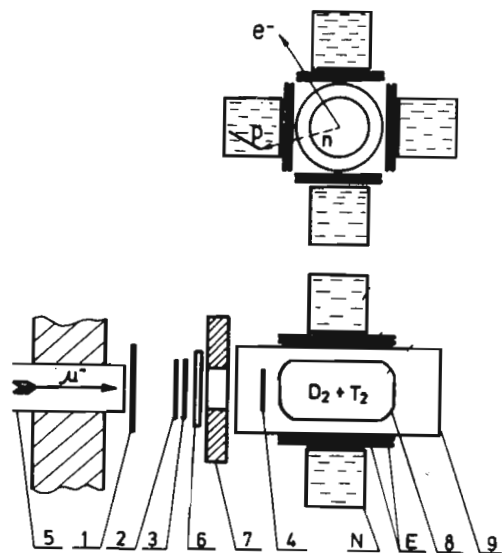


Рис.2. Схема экспериментальной установки: 1, 2, 3 - мониторные счетчики с пластическим сцинтиллятором, 4 - счетчик с кристаллом CsJ(Tl); 5, 7 - коллиматоры; 6 - фильтр; 8 - газовая мишень; 9 - вакуумный кожух; N - детекторы для регистрации нейтронов; E- детекторы для регистрации электронов.

95 мм/. Использование этого сцинтиллятора в нейтронных счетчиках позволило эффективно разделять по форме импульсы от нейтронов и импульсы от γ -квантов, являющиеся следствием переходов $2p-1s$ в мезоатомах железа, из которого сделан корпус газовой мишени.

- Восемь детекторов E для регистрации электронов от распада мюонов /пластические сцинтилляторы размером $340 \times 200 \times 10 \text{ мм}^3$ /.
 - Система очистки дейтерия и трития и заполнения мишени этими газами, упрощенная схема которой приведена на рис. 3.

Очистка дейтерия осуществлялась с помощью цеолитовых адсорберов (CaA). Это позволило получить дейтерий с чистотой по суммарным примесям N_2 , O_2 , CO_2 на уровне 10^{-7} объемных долей.

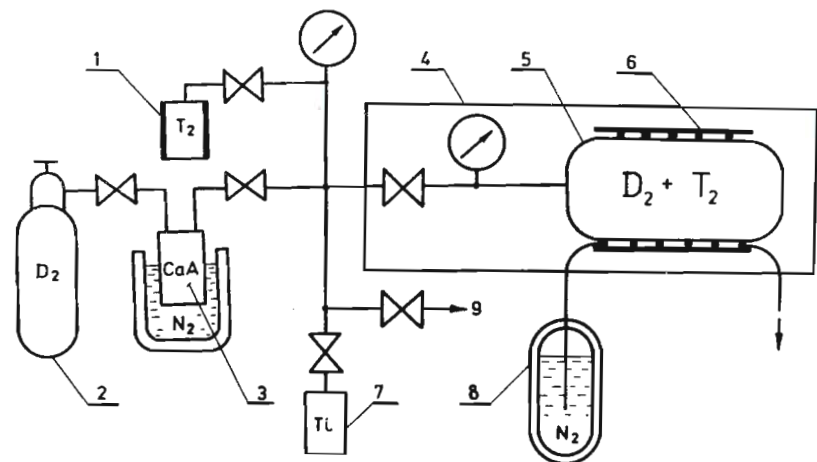


Рис.3. Схема заполнения мишени дейтерием и тритием. 1 - ампула с тритием, 2 - баллон с дейтерием, 3 - система очистки дейтерия на основе цеолитовых адсорберов CaA, 4 - вакуумный кожух газовой мишени, 5 - газовая мишень, 6 - нагреватель, 7 - адсорбер для поглощения смеси (D_2+T_2), 8 - система охлаждения, 9 - выход к системе высоковакуумной откачки.

Исходная чистота трития была на уровне 10^{-6} объемных долей, что вполне удовлетворяло условиям эксперимента. Присутствие ядер ^3He в смеси D_2+T_2 , образующихся в результате естественного распада трития, несколько не влияло на динамику изучаемых процессов, т.к. скорость перехвата мюона с d и t на ^3He пренебрежимо мала.

- Электронная аппаратура, работающая на линии с ЭВМ HP 21MX.

Эксперимент был выполнен на мюонном канале синхроциклотрона на энергию 680 МэВ ОИЯИ. Пучок мюонов с импульсом 130 МэВ/с и интенсивностью $2 \cdot 10^4$ 1/с был выведен мезонным трактом в специальное помещение с повышенной радиационной защитой, в котором располагалась экспериментальная установка. Мюоны после прохождения мониторных счетчиков 1,2,3 тормозились фильтром, регистрировались счетчиком 4 и попадали на га-

зовую мишень 8, в которой находилась смесь дейтерия с тритием при соответствующем давлении. Из-за большой активности трития $\sim 5000 \text{ Ки}$ и высокой температуры /до 850°K / использование традиционной техники выделения останков мюонов с помощью сцинтилляционного счетчика в виде стакана, расположенного внутри мишени 10 , исключалось.

Основная идея методики измерения заключалась в последовательной регистрации нейтронов от реакции /1/ синтеза ядер в $d\mu$ -молекуле и электронов от распада мюонов, освобождающихся в этой реакции. Очевидно, что те мюоны, которые останавливаются не в газе, а в стенках мишени, либо распадаются, и тогда отсутствует нейтрон, либо захватываются ядрами стенок мишени, и тогда отсутствует высокоэнергетичный электрон. Это позволило резко снизить уровень фона и четко идентифицировать изучаемый процесс /1/, хотя отношение числа останков мюонов в стенках мишени и в газовой смеси составляло около 150.

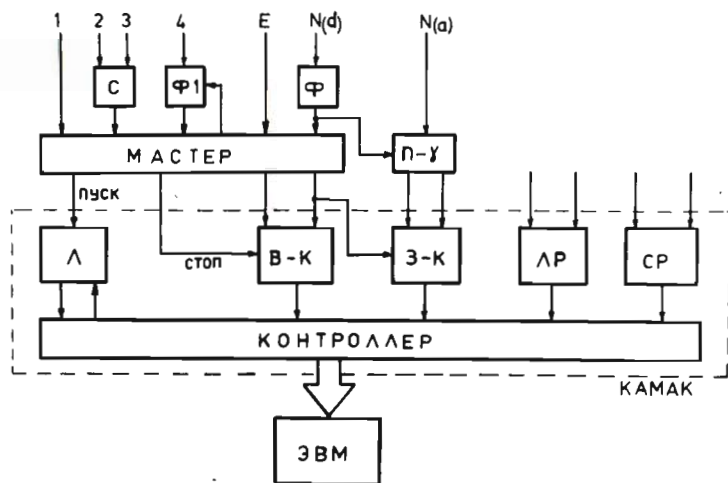


Рис.4. Блок-схема электроники. С - схема совпадения, Ф, Ф1 - формирователи, N(a), N(d) - выходы с анода и катода ФЭУ детекторов нейтронов, (n-γ)- блок разделения нейтронов и γ-квантов /электронов/, "Мастер" - блок отбора событий, /В-К/ - преобразователи время-код, /З-К/ - преобразователи заряд-код, ЛР - логический регистр, СР - счетные регистры, Л - грейдер сигналов L.

Упрощенная блок-схема электроники приведена на рис. 4. Сигнал схемы совпадений С поступал на блок "Мастер", который вырабатывал импульс ворот длительностью 10 мкс, если не было второго мюона в течение предшествующих 5 мкс /импульс с детектора 1/. Для подавления "мгновенного" фона, связанного с остановками мюонов в N, E-детекторах и в стенках мишени, были включены счетчики антисовпадений $23 (\overline{\Sigma E} + \Sigma N)$. Увеличение эффективности отбора нейтронных событий достигалось включением счетчиков на "мгновенные" антисовпадения (N \bar{E}). Вся информация о событии, включающая в себя время появления сигналов с E- и N-детекторов /преобразователи В-К, время-код/, амплитуды сигналов со схемы (n-γ)-разделения /преобразователи З-К, заряд-код/, код логического регистра /ЛР/, показания мониторинговых счетчиков /счетные регистры СР/, передавалась в ЭВМ при выполнении ряда условий. Требовалось наличие сигналов с детекторов E, N /в течение всей длительности ворот/, от счетчика 4 /в течение 0,4 мкс с момента запуска ворот/ и отсутствие импульса со счетчика 1 /в течение всей длительности ворот/.

в/ Проведение эксперимента

На пучке мюонов было проведено несколько экспозиций при различных давлениях смеси $D_2 + T_2$ в мишени, концентрациях трития и температурах. Условия опытов приведены в таблице.

Экспозиции 7 и 8 выполнялись для определения величины нейтронного фона.

В течение эксперимента периодически производилась калибровка энергетической шкалы нейтронных детекторов с помощью стандартных источников ^{60}Co и Po-Be . Во всех перечисленных экспозициях осуществлялось измерение временных спектров событий, зарегистрированных E- и N-детекторами, а также амплитудных распределений и импульсов от нейтронных счетчиков. В качестве примера на рис. 5 представлено двухмерное амплитудное распределение событий, полученное в экспозиции 14 для одного из нейтронных детекторов. Энергетический порог в амплитудном канале был установлен на уровне 3 МэВ для того, чтобы исключить вклад фона, связанного с синтезом ядер в $d\mu$ -молекуле $/E_n = 2,5 \text{ МэВ}/$.

Основные экспериментальные данные, характеризующие экспозиции

Экспозиция	Давление газа в мишенях (атм) при 293°K	Состав газа	Атомарная концентрация трития C_t	Температура мишени (°K)	Число зарегистрированных нейтронов N_n	Число зарегистрированных электронов $N_e \cdot 10^{-3}$
I	21,0	$D_2 + T_2$	$3 \cdot 10^{-2}$	293	2762	566,1
2	"	"	"	443	1996	384,3
3	"	"	"	563	2003	382,5
4	"	"	"	613	2107	407,6
5	10,5	"	"	293	1452	696,9
6	21,0	"	$1,57 \cdot 10^{-2}$	293	1250	467,6
7	21,0	D_2	0	293	152	297,3
8	10^{-5} мм Hg	ВАКУУМ	0	293	24	42,9
9	6,6	$D_2 + T_2$	$7,8 \cdot 10^{-2}$	93	98	52,0
10	"	"	"	143	236	129,3
II	"	"	"	193	207	93,6
12	"	"	"	243	472	240,3
13	"	"	"	293	273	135,9
14	66,2	"	$0,81 \cdot 10^{-2}$	93	8765	1734,5

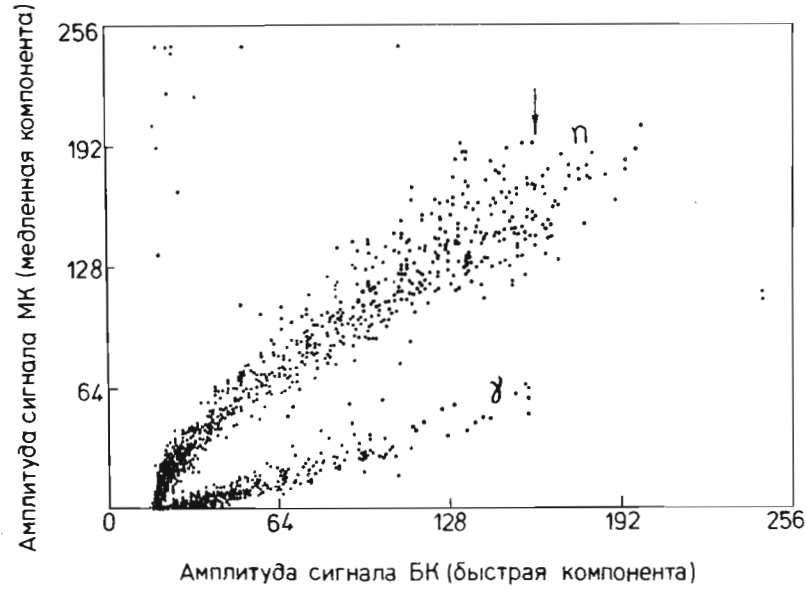


Рис.5. Двухмерное амплитудное распределение событий, зарегистрированных нейтронным детектором в одной из экспозиций.

ОТБОР СОБЫТИЙ. ОБАБОТКА ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Отбор нейтронных событий реакции /1/ производился с использованием следующих критериев:

1/ рассматривались события, принадлежащие только нейтронной области на двухмерных амплитудных распределениях /см. рис. 5/;

2/ отбирались события, энергия протона отдачи которых составляла больше 3 МэВ;

3/ отбирались нейтронные события, для которых $t_e > t_n$, где t_e и t_n - времена появления сигналов с Е- и N-детекторов относительно остановки мюона;

4/ не рассматривались случаи регистрации событий двумя и более N-детекторами в течение длительности ворот.

Нормированные временные и амплитудные распределения событий, полученные в опытах 7 и 8 /фоновые экспозиции/, вычитались поканально из соответствующих распределений, измеренных в экспозициях с D_2+T_2 . Относительный вклад нейтронного фона для разных экспозиций составлял от 0,5% до 10%.

В настоящее время выполнена только предварительная обработка экспериментальных данных. При этом для значения скорости перехвата мюона с дейтрона на тритон λ_{dt} получено значение

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

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

Полученное значение λ_{dt} находится в хорошем согласии с результатом теоретических вычислений^{/11/}. Найденная нижняя граница скорости образования $dt\mu$ -молекул согласуется с те-

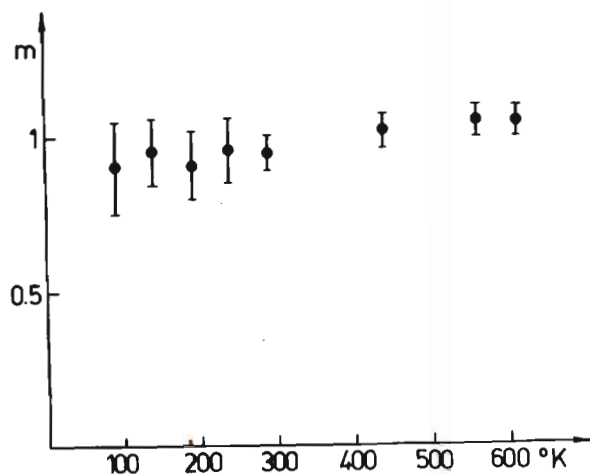


Рис.6. Зависимость экспериментального выхода нейтронов в относительных единицах от температуры газовой смеси (D_2+T_2).

ретическим значением $\lambda_{dt\mu} = 10^8$, 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 /1/ с температурой. Однако, как видно из рис. 6, наблюдаемый на опыте выход нейтронов (η_n) в пределах погрешности измерений 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 λ_0 /см. формулу /2//.

Другая возможная интерпретация этого факта связана с тем, что за время термализации $t\mu$ -атома $\sim 10^{-7}$ с он не успевает достигнуть тех малых энергий, при которых скорость образования $dt\mu$ -молекул согласно резонансному механизму должна резко уменьшаться.

Как уже отмечалось, результаты наших измерений подтверждают предсказания теории о больших значениях λ_{dt} и $\lambda_{dt\mu}$. Таким образом, оказываются выполняющимися два из основных необходимых условий, определяющих возможность эффективно-го использования мюонного катализа реакции $d+t$ как высокоинтенсивного источника нейтронов с энергией 14,1 МэВ. Третьей важной константой, существенно влияющей на интенсивность этого источника нейтронов, является коэффициент прилипания мюонов к $^4\text{He}-\omega_s$, так как его величина определяет максимально возможное число циклов реакции dt , генерируемых одним отрицательным мюоном. Для определения величины ω_s необходимо ставить специальные опыты.

В заключение авторы выражают благодарность С.С.Герштейну и Л.И.Пономареву за многочисленные плодотворные дискуссии по проблеме мю-катализа; 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; Г.Ф.Исаеву, М.М.Петровскому, Ш.Г.Шамсутдинову, А.А.Борисовой и Л.М.Старшине за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gerstein S.S., Ponomarev L.I. Mesomolecular Processes Induced by μ^- and π^- Mesons. In: Muon Physics, Ed. Hughes V., Wu C.S. Academic Press, New York, 1975.
2. Весман Э. Письма в ЖЭТФ, 1967, 5, с. 113.
3. Виноцкий С.И. и др. ЖЭТФ, 1978, 74, с. 849.
4. Быстрицкий В.М. и др. В кн.: Труды Международного симпозиума по проблемам мезонной химии и мезомолекулярных процессов в веществе. Дубна, 7-19 июня, 1977; ОИЯИ, Д1-2-14-10908, Дубна, 199.
5. Быстрицкий В.М. и др. ЖЭТФ, 1979, 76, с. 460.
6. Беляев В.Б. и др. ЖЭТФ, 1959, 37, с. 1652.
7. Ponomarev L.I. VII International Conference of High-Energy Physics and Nuclear Structure (p. 403), 28 August - 2 September, 1977, Zurich, Switzerland.
8. Gerstein S.S., Ponomarev L.I. Phys.Lett., 1977, 72B, p. 80.
9. Петров Ю.В. Труды XIV школы ЛИЯФ АН СССР, Л., 1979, с. 139.
10. Будяшов Ю.Г. и др. ОИЯИ, P15-3964, Дубна, 1968. Быстрицкий В.М. и др. ЖЭТФ, 1974, 66, с. 43.
11. Ponomarev L.I. In: Proceedings of the VI International Conference on Atomic Physics (p. 182), August 17-22, 1978, Riga, Zinante-Riga USSR, Plenum Press - New York and London.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 июля 1979 года.