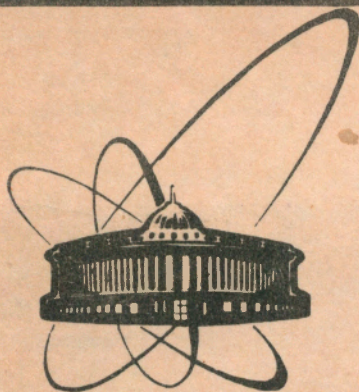


99-323



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

Д15-92-323

В.Б.Беляев, А.Бертин¹, В.М.Быстрицкий, А.Витале¹,
Я.Возняк², А.Гула², О.И.Картавцев, А.В.Кравцов³,
Л.А.Ривкис⁴, С.И.Сорокин⁴, С.Г.Стеценко,
В.А.Столупин

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИЙ ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА
В ЗАРЯДОВО-НЕСИММЕТРИЧНЫХ
МЮОННЫХ МОЛЕКУЛАХ

¹Национальный институт ядерных исследований, г.Болонья, Италия

²Институт физики и ядерной техники, г.Краков, Польша

³Санкт-Петербургский институт ядерной физики, г.Гатчина

⁴Всесоюзный научно-исследовательский институт
неорганических материалов, г.Москва

Введение

Исследование реакций с легкими ядрами (p, d, t, He, Li, Be) в области сверхнизких энергий (эВ-кэВ) представляет большой интерес. Это обусловлено тем, что такого типа реакции протекают в звездах и Галактике, и поэтому знание характеристик этих процессов, безусловно, поможет разрешить ряд проблем, существующих в астрофизике^{/1/}.

Другим важным направлением этих исследований является проверка фундаментальных симметрий в сильном взаимодействии при сверхнизких энергиях, таких как зарядовая симметрия, четность и т.д. Наибольший интерес представляет изучение некоторых динамических загадок, например, существование слабосвязанных состояний или резонансов в малоадронных системах.

Однако измерение сечений этих реакций в прямых столкновениях в указанной области энергий в настоящее время из-за технических сложностей практически неосуществимо. В связи с этим предлагаемый проект ставит своей целью получение информации о характеристиках данных реакций, протекающих в мю-молекулярных комплексах типа ${}^{3,4}\text{He}\mu$, ${}^{3,4}\text{He}\mu$, ${}^{6,7}\text{Li}\mu$, ${}^{6,7}\text{Li}\mu$, ${}^{6,7}\text{Li}\mu$, образующихся в процессе перехвата отрицательных мюонов от мю-атомов изотопов водорода к ядрам He, Li.

Кроме этого следует добавить, что исследование ядерных реакций, протекающих в таких зарядово-несимметричных мюонных молекулах, представляет и самостоятельный интерес. Это связано со следующими обстоятельствами:

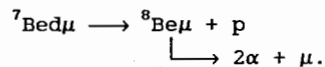
1) знание характеристик процесса образования мю-молекулярных комплексов ${}^{3,4}\text{He}\mu$, ${}^{3,4}\text{He}\mu$, скоростей девозбуждения и ядерного синтеза в них позволит корректно анализировать данные, полученные в экспериментах по исследованию мю-атомных и мю-молекулярных процессов в смесях изотопов водорода;

2) имеется возможность получить информацию о характеристиках ядерных реакций в области энергий столкновения, близких к нулю;

3) данные эксперименты являются хорошим тестом для проверки алгоритма теоретических вычислений скоростей ядерных реакций в мю-молекулярных комплексах легких элементов;

4) появляется экспериментальная возможность определения времени жизни мю-молекулярного комплекса относительно различных каналов его распада.

Особый интерес представляет изучение реакции



Так как в реакции на леву $d + {}^7\text{Be} \longrightarrow {}^8\text{Be} + p$ выделяется энергия на несколько десятков кэВ больше энергии возбужденного состояния ядра ${}^8\text{Be}$, то можно ожидать, исходя из полюсной диаграммы, что скорость данной реакции в мю-молекуле ${}^7\text{Be}d\mu$ будет достаточно большой. Это обусловлено тем, что кулоновский барьер не препятствует распространению нейтрона, и передача нейтрона от дейтрона к ядру ${}^7\text{Be}$ происходит с выделением энергии $\Delta E = 40$ кэВ. Большая скорость реакции синтеза в мю-молекулярном комплексе ${}^7\text{Be}d\mu$ соответствует вполне заметному выходу α -частиц, что, в свою очередь, позволит с достаточно хорошей точностью измерить характеристики данной ядерной реакции.

К настоящему времени экспериментально доказано, что перехват мюонов от мю-атомов водорода, находящихся в основном состоянии, к ядрам He, Li обусловлен молекулярным механизмом перезарядки мезоводорода^{/2-5/} и происходит в два этапа: с образованием промежуточного мю-молекулярного комплекса и с последующим переходом мюона от мезоводорода к ядрам He и Li.

До настоящего времени в литературе отсутствуют экспериментальные данные о скоростях реакций ядерного синтеза в зарядово-несимметричных мюонных молекулах. Имеются только две теоретические работы^{/6,7/}, посвященные этому вопросу, результаты которых отличаются примерно на 10 порядков.

Данный факт еще раз свидетельствует о необходимости проведения таких экспериментальных исследований с целью получения информации о скоростях ядерных реакций синтеза в мю-молекулярных комплексах.

Учитывая то, что согласно теоретическим оценкам^{/6/} скорость ядерного синтеза в мю-молекулярных комплексах существенно меньше скорости его девозбуждения за счет Оже- и радиационных переходов, вполне очевидно, что для получения количественной информации о характеристиках ядерных реакций необходимо проведение данных исследований на ускорителях с интенсивными мюонными пучками - на мезонных фабриках.

В проекте рассмотрены две методики постановки опытов по исследованию реакций ядерного синтеза в мю-молекулярных комплексах, а также приведены верхние граничные оценки скоростей этих реакций, которые можно извлечь из анализа экспериментальных данных. Для реализации предлагаемой программы исследований требуются интенсивные мюонные пучки, аналогичные имеющимся в PSI^{/8/}.

Кинетика мю-атомных и мю-молекулярных процессов

На рис. 1,2,3 приведены схемы мю-атомных и мю-молекулярных процессов, происходящих после остановки отрицательных мюонов в дейтериде лития и в смесях $D_2 + {}^3\text{He}$, $T_2 + {}^3\text{He}$.

Отрицательные мюоны, попадая в дейтерид (тритид) лития либо в смесь дейтерия или трития с гелием, испытывают потери энергии за счет ионизации молекул среды, замедляются и захватываются атомами лития, дейтерия, трития, гелия, образуя мю-атомы $Li\mu$, $d\mu$, $t\mu$, $He\mu$. В результате прямой посадки мюонов на атомы изотопов водорода образуются $d\mu(t\mu)$ -атомы с начальной энергией ≈ 1 эВ, находящиеся в возбужденном состоянии с $n \approx 14$ (n - главное квантовое число). В дальнейшем за счет Оже- и радиационных переходов происходит девозбуждение мю-атомов изотопов водорода и их термализация. Как в процессе девозбуждения, так и из основного состояния $d\mu(t\mu)$ -атомов возможен перехват мюонов к ядрам Li и He с образованием

промежуточных мю-молекулярных комплексов $Li\mu$, $Li\mu$, $He\mu$, $He\mu$. Распад таких комплексов может происходить по различным каналам:

а) за счет Оже- и радиационных переходов из возбужденного состояния ($3d\sigma$ - в случае системы $Li\mu$, $Li\mu$ и $2p\sigma$ - $He\mu$, $He\mu$)^{/9/} в основное состояние $1s\sigma$ (отталкивательный терм);

б) в результате протекания ядерных реакций в них.

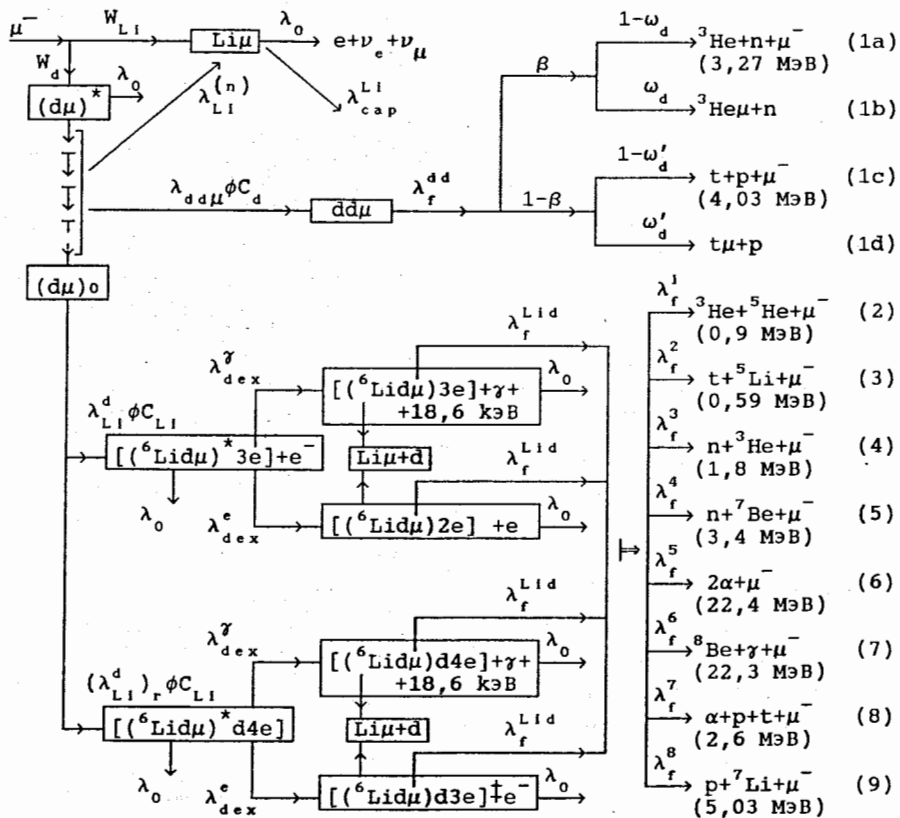


Рис. 1. Схема мюонных процессов, протекающих в дейтериде лития

Измеряя выход продуктов ядерной реакции по какому-либо каналу и привлекая расчетные значения скоростей девозбуждения мю-молекулярного комплекса, а также соотношение между вероятностями различных каналов реакции, можно получить верхнюю граничную оценку суммарной скорости ядерного синтеза в μ -комплексе.

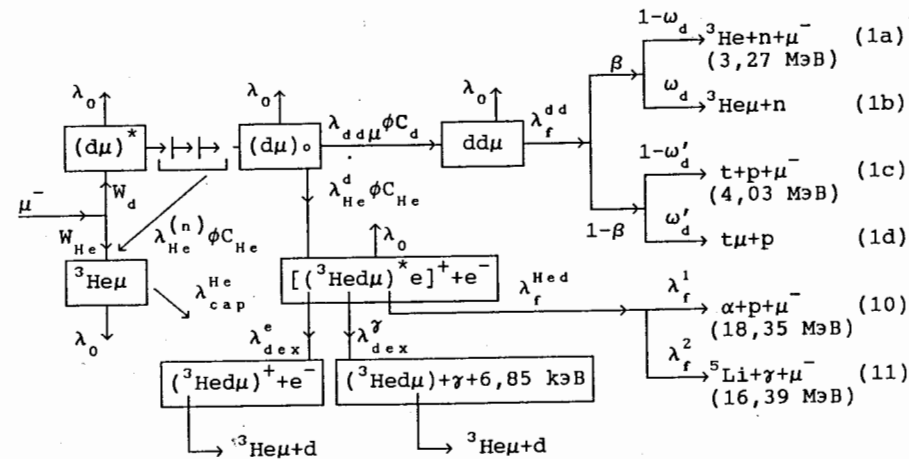
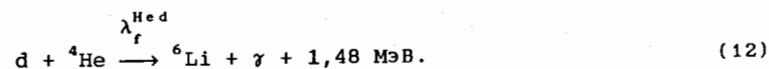


Рис. 2. Схема мю-атомных и мю-молекулярных процессов, протекающих в смеси $D_2 + {}^3He$

В случае проведения опыта со смесью $D_2 + {}^4He$ схема процессов аналогична приведенной за одним лишь исключением: образуется мю-комплекс ${}^4He\mu$, в котором возможно протекание ядерной реакции



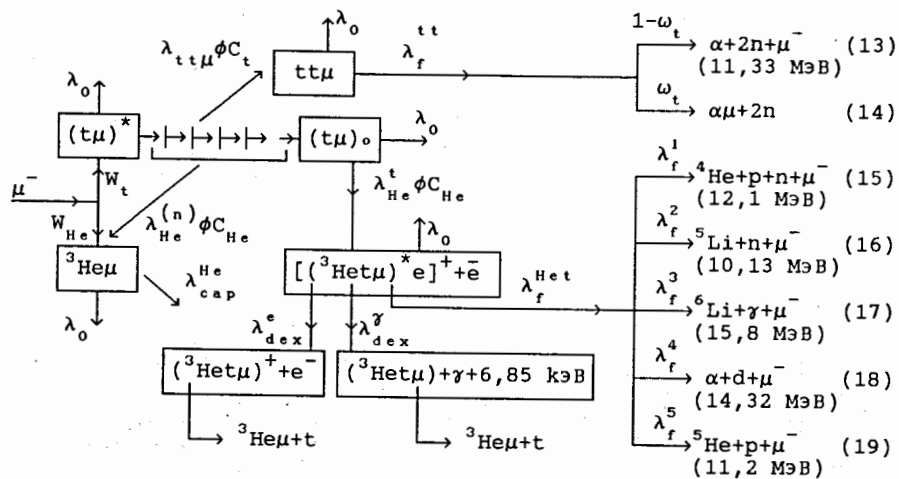
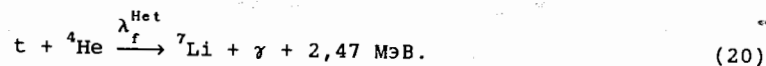


Рис. 3. Схема процессов в смеси $T_2 + {}^3\text{He}$

В опыте со смесью $T_2 + {}^4\text{He}$ возможно наблюдение реакции



Нами введены следующие обозначения:

- $\lambda_0 = 0,455 \times 10^6 \text{ с}^{-1}$ - скорость распада свободного мюона;
- $\lambda_{\text{dd}\mu}, \lambda_{\text{tt}\mu}$ - скорости образования $\text{dd}\mu$ - и $\text{tt}\mu$ -молекул, приведенные к плотности жидкого водорода ($n_0 = 4,25 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$);
- $W_d, W_{\text{He}}, W_{\text{Li}}$ - вероятности прямой посадки мюонов на атомы дейтерия, гелия и лития соответственно;
- $\lambda_{\text{cap}}^{\text{He}}, \lambda_{\text{cap}}^{\text{Li}}$ - скорости захвата мюонов ядрами гелия и лития;
- ϕ - атомарная плотность смеси $D_2 + \text{He}$ или $T_2 + \text{He}$, дейтерида лития (LiD) относительно плотности жидкого водорода;

$C_d, C_{\text{He}}, C_{\text{Li}}$ - атомарные концентрации дейтерия, гелия и лития;
 $\lambda_{\text{He}}^{(n)}, \lambda_{\text{Li}}^{(n)}, \lambda_{\text{He}}^d, \lambda_{\text{He}}^t, \lambda_{\text{Li}}^d, \lambda_{\text{Li}}^t$ - скорости перехвата мюонов от $\text{d}\mu$ - и $\text{t}\mu$ -атомов, находящихся в возбужденном и основном состояниях, к ядрам He и Li ;

$(\lambda_{\text{Li}}^d)_r$ - скорость резонансного образования мю-молекулярного комплекса $(\text{Li}d\mu)$: $\text{d}\mu + \text{LiD} \rightarrow [(\text{Li}d\mu)^* \text{d}4e]^*$;

β - относительная вероятность реакции dd -синтеза в $\text{dd}\mu$ -молекуле с образованием нейтрона;

ω_d, ω_t - вероятности прилипания мюонов к ядрам ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$, образующимся в результате реакций синтеза в $\text{dd}\mu$ - и $\text{tt}\mu$ -молекулах.

$\lambda_{\text{dex}}^e, \lambda_{\text{dex}}^\gamma$ - скорости девозбуждения мю-молекулярных комплексов типа $\text{He}d\mu, \text{He}t\mu, \text{Li}d\mu, \text{Li}t\mu$ за счет Оже- и радиационных переходов;

$\lambda_f^{\text{Hed}}, \lambda_f^{\text{Het}}, \lambda_f^{\text{Lid}}, \lambda_f^{\text{Lit}}$ - скорости ядерного синтеза в мю-молекулярных комплексах;

λ_f^i - парциальная скорость ядерного синтеза в мю-молекулярном комплексе по i -му каналу ($\lambda_f = \sum_{i=1}^m \lambda_f^i$);

m - число возможных каналов протекания ядерной реакции синтеза в мю-комплексе.

Постановка опыта

а) Эксперименты с использованием мишеней из LiH ($\text{H} = \text{H, D, T}$)

Вначале рассмотрим постановку эксперимента по исследованию ядерных реакций, протекающих в мю-молекулярном комплексе ${}^6\text{Li}d\mu$. Принимая во внимание то, что реакция синтеза ядер лития и дейтерия может протекать по различным каналам^{10/}, нами для ее исследования предлагается методика регистрации двух каналов:

- 1) с образованием α -частиц (${}^6\text{Li}d\mu \rightarrow 2\alpha + \mu + 22,4 \text{ МэВ}$);
- 2) с образованием γ -кванта (${}^6\text{Li}d\mu \rightarrow {}^8\text{Be} + \mu + \gamma + 22,3 \text{ МэВ}$).

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 4.

Для выделения акта остановки мюонов в объеме мишени используются сцинтилляционные детекторы 1,2 (пластический сцинтиллятор). Детектор 2 изготовлен в виде полого стакана прямоугольного сечения, внутри которого располагается мишень.

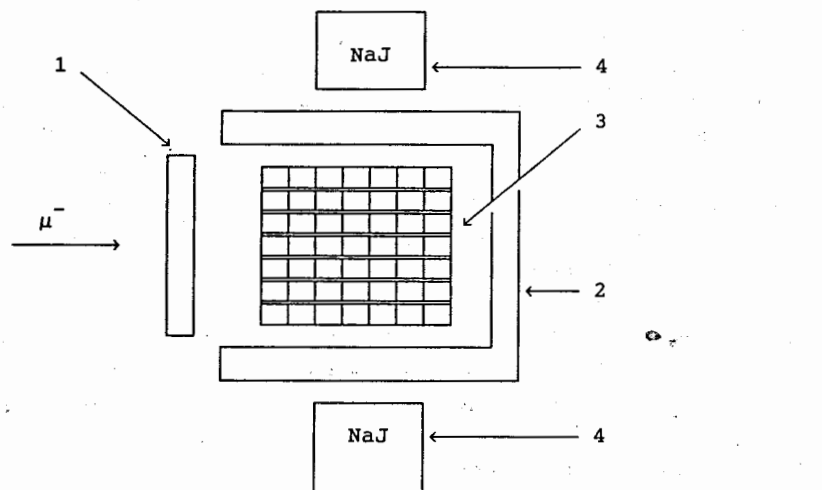


Рис.4. Схема экспериментальной установки

Мишень 3 представляет собой "сэндвич", состоящий из твердотельных трековых детекторов (CR-39, CN-85)^{/11/} толщиной 0,5 мм, предназначенных для регистрации образующихся в реакции (6) α-частиц, с расположенными между ними слоями из дейтерида лития (LiD) толщиной ~70 мкм. Размеры трековых детекторов и их количество определяются характеристиками мюонного пучка (профилем пучка по горизонтали и вертикали), а также полным пробегом мюонов с данным импульсом в веществе мишени (пробег мюонов с импульсом ~ 60 МэВ/с в LiD с учетом импульсного разброса пучка мюонов Δp/p ~ 0,1 равен ~ 25 мм).

Исходя из этого выбраны следующие размеры детектора: 40 × 0,5 × 25 мм. Количество детекторов в "сэндвиче" составляет 70.

Сигнал остановки мюона (12) запускает ворота длительностью 5 мкс, в течение которых производится регистрация γ-квантов с энергией 22,3 МэВ из реакции (7) и электронов от распада мюонов.

Регистрация γ-квантов осуществляется с помощью двух детекторов 4 (кристаллы NaJ(Tl) - ø 100 мм, h = 100 мм), а электронов - детектором 2. Регистрация электронов от распада мюонов необходима для определения числа остановок мюонов в дейтериде лития, знание которого позволит получить нормированное значение выхода продуктов исследуемой реакции ядерного синтеза.

Использование предложенной конструкции мишени-детектора обеспечит надежную идентификацию ядерной реакции (6) путем регистрации твердотельными трековыми детекторами (между которыми находится слой LiD) двух α-частиц, вылетающих под углом 180° (энергия каждой α-частицы равна 11,2 МэВ).

Оценки граничных значений скоростей ядерных реакций (6) и (7) можно получить из анализа экспериментальных данных.

При интенсивности падающего пучка мюонов $N_{\mu} = 2 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$ полное число остановок мюонов в 70 слоях LiD в единицу времени составит

$$N_{\mu \text{ stop}}^{\text{LiD}} = N_{\mu} \frac{d_{\text{LiD}}}{d_{\text{det}}} = 2 \times 10^5 \cdot \frac{70}{500} \text{ с}^{-1} = 2,8 \times 10^4 \text{ с}^{-1}, \quad (21)$$

где d_{LiD} , d_{det} - толщины слоя LiD и трекового детектора соответственно ($d_{\text{LiD}} = 70 \text{ мкм}$, $d_{\text{det}} = 500 \text{ мкм}$).

Количество мю-молекулярных комплексов $\text{LiD}\mu$, образующихся в результате столкновения $\mu\text{-}$ атомов с молекулами LiD, равно

$$N_{\text{LiD}\mu} = N_{\mu \text{ stop}}^{\text{LiD}} K_d \frac{\lambda_{\text{Li}}^d \phi C_{\text{Li}}}{\lambda_o + \lambda_{\text{dd}\mu} \phi C_d \beta \omega_d + \lambda_{\text{Li}}^d \phi C_{\text{Li}}}, \quad (22)$$

где $K_d = 5 \times 10^{-2/12}$ - вероятность прямой посадки мюонов на атомы дейтерия.

Так как $\lambda_{\text{Li}}^d \phi C_{\text{Li}} \gg \lambda_o$, $\lambda_{\text{dd}\mu} \phi C_d$ ($\lambda_{\text{Li}}^d = 3,8 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1/13}$, $\lambda_{\text{dd}\mu} = 2,7 \times 10^6 \text{ с}^{-1/14, 15/}$), то выражение (22) можно представить в виде

$$N_{\text{Li}\mu} = N_{\mu \text{ stop}}^{\text{Li}\mu} K_d = 2,8 \times 10^4 \times 5 \times 10^{-2} \text{ c}^{-1} = 1,4 \times 10^3 \text{ c}^{-1}.$$

Выходы зарегистрированных продуктов реакций (6) и (7) в расчете на один образовавшийся мю-молекулярный комплекс $\text{Li}\mu$ можно определить как

$$Y_{2\alpha} = \epsilon_{2\alpha} \frac{\lambda_f^{2\alpha}}{\lambda_f^{\text{Li}\mu} + \lambda_{\text{dex}}}, \quad (23)$$

$$Y_{\gamma} = \epsilon_{\gamma} \frac{\lambda_f^{\gamma}}{\lambda_f^{\text{Li}\mu} + \lambda_{\text{dex}}}, \quad (24)$$

где $\lambda_f^{2\alpha}$, λ_f^{γ} - скорости ядерного синтеза в $\text{Li}\mu$ -молекуле с образованием двух α -частиц и γ -кванта соответственно; λ_{dex} - скорость девозбуждения мю-молекулярного комплекса $[(\text{Li}\mu)\text{Ze}]$ ($\lambda_{\text{dex}} = 10^{12} \text{ c}^{-1/16}$, $\lambda_{\text{dex}} \gg \lambda_f^{\text{Li}\mu/6,7}$); $\epsilon_{2\alpha}$, ϵ_{γ} - эффективности регистрации двух α -частиц и γ -кванта экспериментальной установкой (согласно расчетам $\epsilon_{2\alpha} = 0,5$, $\epsilon_{\gamma} = 0,1$).

При наборе статистики в течение времени t граничные оценки скоростей реакций (6) и (7) на 90%-м уровне достоверности определяются как

$$\lambda_f^{2\alpha} \leq \frac{\lambda_{\text{dex}}}{N_{\text{Li}\mu} \epsilon_{2\alpha} t}, \quad (25)$$

$$\lambda_f^{\gamma} \leq \frac{\lambda_{\text{dex}}}{N_{\text{Li}\mu} \epsilon_{\gamma} t}. \quad (26)$$

При $t = 300$ ч получены следующие оценки величин $\lambda_f^{2\alpha}$ и λ_f^{γ} :

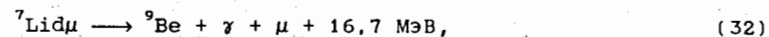
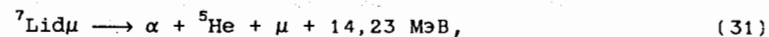
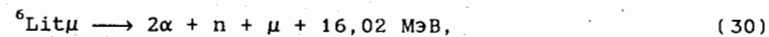
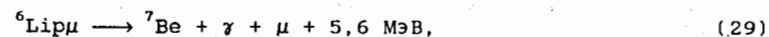
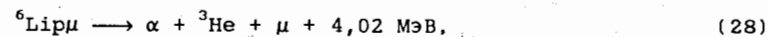
$$\lambda_f^{2\alpha} \leq 10^3 \text{ c}^{-1}; \quad \lambda_f^{\gamma} \leq 5 \times 10^3 \text{ c}^{-1}.$$

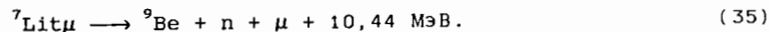
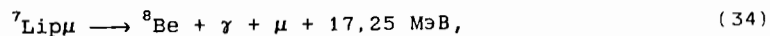
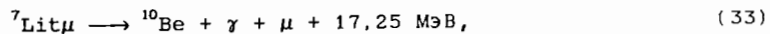
Привлекая расчетные значения парциальных вероятностей каналов (6) и (7) реакции синтеза ядер дейтерия и лития, можно определить граничную оценку суммарной скорости ядерного синтеза в $\text{Li}\mu$ -молекуле:

$$\lambda_f^{\text{Li}\mu} \leq \frac{\lambda_f^{2\alpha}}{\beta_1}; \quad \lambda_f^{\text{Li}\mu} \leq \frac{\lambda_f^{\gamma}}{\beta_2}, \quad (27)$$

где β_1 , β_2 - парциальные вероятности протекания ядерной реакции в $\text{Li}\mu$ -молекуле по каналам (6) и (7) соответственно.

Использование предложенной методики позволяет также проводить исследования следующих ядерных реакций^{/10/}:





Кроме этого, добавление канала регистрации нейтронов существенно расширит функциональные возможности установки: появится возможность оценить скорости реакций синтеза в мю-молекулярных комплексах с образованием нейтронов.

б) Эксперименты с использованием газовых и криогенных мишеней, заполненных смесями $\text{H}_2 + {}^{3,4}\text{He}$ ($\text{H} = \text{H}, \text{D}, \text{T}$)

Для исследования ядерных реакций, протекающих в мю-молекулярных комплексах ${}^{3,4}\text{He}\mu$, ${}^{3,4}\text{H}\mu$, предлагается использование методики, основанной на регистрации γ -квантов с энергиями 1,5 - 16,4 МэВ, образующихся в реакциях (11), (12), (17), (20)^{/10/}. Это связано, во-первых, с низким уровнем γ -фона в указанной области энергий и, во-вторых, с отсутствием конкурирующих процессов, приводящих к возникновению γ -излучения данной энергии (в случае регистрации нейтронов конкурирующими процессами являются образование $\text{dd}\mu$ - и $\text{tt}\mu$ -молекул и последующее испускание нейтронов в результате реакции синтеза изотопов водорода в них).

В качестве мишеней могут быть использованы криогенные и газовые мишени, заполняемые смесью изотопов водорода и гелия. Регистрирующая аппаратура и электронная логика эксперимента описаны в разделе а).

Ниже приведены условия проведения опытов и оценки ожидаемых результатов. Рассмотрим постановку опыта с использованием мишени, заполненной жидким дейтерием с добавкой ${}^3\text{He}$, концентрация которого составляет 4×10^{-4} (при этом давление гелия в газовой фазе составляет ~ 3 атм). Мишень имеет форму цилиндра диаметром 40 мм и длиной 120 мм (длина мишени соответствует среднему пробегу мюонов с импульсом ≈ 60 МэВ/с в жидком дейтерии с учетом импульсного разброса мюонов). Следует отметить, что в такой постановке эксперимента детектор 2 представляет собой полный цилиндр диаметром 45 мм и длиной 125 мм, изготовленный из пластического сцинтиллятора.

Для приведенных условий опытов со смесью $\text{D}_2 + {}^3\text{He}$ число образующихся мю-молекулярных комплексов ${}^3\text{He}\mu$ в единицу времени будет равно

$$N_{\text{He}\mu} = N_{\mu} \frac{\lambda_{\text{He}}^d \phi_{\text{He}}}{\lambda_0 + \lambda_{\text{dd}\mu} \phi_{\text{D}} + \lambda_{\text{He}}^d \phi_{\text{He}}} a \approx 4 \times 10^4 \text{ с}^{-1}, \quad (36)$$

где N_{μ} - интенсивность мюонного пучка ($N_{\mu} = 2 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$); $\lambda_{\text{He}}^d = 2,17 \times 10^8 \text{ с}^{-1/13/}$; $\lambda_{\text{dd}\mu} = 0,047 \times 10^6 \text{ с}^{-1/17/}$; $a \approx 1$ - относительная вероятность прямой посадки мюона на атом водорода в смеси $\text{D}_2 + \text{He}$ ($a = 1/(1 + A_{\text{He}})$, $A = 1,8^{/18/}$ - отношение тормозных способностей атомов гелия и дейтерия).

Число γ -квантов с энергией 16,4 МэВ, зарегистрированных за время t (с), можно определить как

$$N_{\gamma} = N_{\text{He}\mu} \epsilon_{\gamma} \frac{\lambda_{\gamma}}{\lambda_{\gamma}^{\text{He}\mu} + \lambda_{\text{dex}}} t, \quad (37)$$

где λ_{γ} - скорость реакции синтеза в молекуле ${}^3\text{He}\mu$ с испусканием γ -кванта; ϵ_{γ} - эффективность регистрации γ -кванта эксперименталь-

ной установкой ($\epsilon_{\gamma} = 0,1$); λ_{dex} - скорость девозбуждения мю-комплекса ${}^3\text{He}\mu$ ($\lambda_{dex} \gg \lambda_f^{\text{He d}}$).

На основании формулы (37) на 90%-м уровне достоверности граничная оценка скорости реакции λ_f^{γ} при условии набора статистики в течение 300 ч равна

$$\lambda_f^{\gamma} = \frac{\lambda_{dex}}{N_{\text{He}\mu} \epsilon_{\gamma} t} = 2 \times 10^2 \text{ с}^{-1}. \quad (38)$$

Принимая во внимание данные работы^{10/} о соотношении величин λ_f^{γ} и λ_f ($\lambda_f^{\gamma}/\lambda_f \approx 10^{-4}$ в области энергий столкновения дейтронов с ядрами гелия ~100 кэВ), нетрудно получить граничную оценку измеряемой скорости ядерного синтеза λ_f в мю-молекулярном комплексе ${}^3\text{He}\mu$:

$$\lambda_f^{\text{He d}} \approx 2 \times 10^6 \text{ с}^{-1}.$$

Если же скорость λ_f^{γ} реально больше, чем $2 \times 10^2 \text{ с}^{-1}$, то в результате анализа экспериментальных данных могут быть найдены значения величин λ_f^{γ} и λ_f с указанием погрешностей их измерений. Следует отметить, что отношение $\lambda_f^{\gamma}/\lambda_f$, измеренное в экспериментах на лету, в принципе, может отличаться от отношения соответствующих величин в случае протекания ядерной реакции в мю-молекулярном комплексе ${}^3\text{He}\mu$.

Литература

1. M.Arnould, M.Forestini / Nuclear Astrophysics Proc. of the Third Intern. Summer School, La Huelva, Spain, 1988.2 Springer-Verlag, Research Reports in Physics, p. 48.
2. В.М.Быстрицкий и др. // ЖЭТФ, 1983, т. 84, с. 1257.
3. A.Bertin et al. // AIP Conf. Proc., 1989, v. 181, p. 161.
4. A.Caffrey et al. // Muon Catalyzed Fusion, 1987, v. 1, p. 53.

5. T.Matsuzaki et al. // Muon Catalyzed Fusion, 1988, v. 2, p. 217.
6. A.V.Kravtsov, N.P.Popov and G.E.Solyakin, Preprint LINR 958, Leningrad, 1984; Письма ЖЭТФ, 1984, т. 40, с. 124.
7. D.Harley, B.Müller and J.Rafelski, Preprint AZPH-TH/88, Arizona, 1988; AIP Conf. Proc., 1989, v. 181, p. 239.
8. A.Badertscher et al., PSI-PR-90-41, November 1990.
9. А.В.Кравцов, А.М.Михайлов и Н.П.Попов // ЖЭТФ, 1989, т. 96, с. 437.
10. F.Ajzenberg-Selove // Nucl. Phys., 1988, v. A490, p. 1.
11. С.Дюррани, Р.Балл / Твердотельные трековые детекторы -М.: Энергоатомиздат, 1990.
12. З.В.Крумштейн и др. // ЖЭТФ, 1968, т. 54, с. 1690.
13. В.К.Иванов и др. // ЖЭТФ, 1986, т. 91, с. 358.
14. А.А.Вороб'ев // Muon Catalyzed Fusion, 1988, v. 2, p. 17.
15. V.M.Bystritsky et al. // AIP Conf. Proc., 1989, v. 181, p. 17.
16. А.В.Кравцов, Н.П.Попов, Г.Е.Солякин // ЯФ, 1982, т.35, с.1498.
17. V.M.Bystritsky et al. // Muon Catalyzed Fusion, 1990/91, v. 5/6, p. 141.
18. В.И.Петрухин и В.М.Суворов // ЖЭТФ, 1976, т. 70, с. 1145.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 июля 1992 года.

Беляев В.Б. и др.

D15-92-323

Исследование реакций ядерного синтеза
в зарядово-несимметричных мюонных молекулах

Предлагается исследовать реакции синтеза легких ядер (H, He, Li, Be) в зарядово-несимметричных мюонных молекулах $\text{He}\mu$, $\text{Li}\mu$, $\text{Be}\mu$, где H = p, d, t. В предложенном проекте рассмотрены методика, условия проведения опытов по исследованию реакций ядерного синтеза в мюонных молекулах $^3,^4\text{He}\mu$, $^6,^7\text{Li}\mu$, а также приведены граничные оценки скоростей реакций ядерного синтеза, которые можно получить в результате проведения экспериментов. Для реализации предлагаемой программы исследований требуются интенсивные мюонные пучки.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1992

Перевод авторов

Belyaev V.B. et al.

D15-92-323

Investigation of Nuclear Fusion Reactions
in Charge-Nonsymmetric Muonic Molecules

The project presents an experimental programme on the study of fusion of light nuclei (H, He, Li, Be) in charge-nonsymmetric muonic molecules $\text{He}\mu$, $\text{Li}\mu$, $\text{Be}\mu$ (H is p, d, t). The project describes techniques, conditions of experiments on the study of nuclear fusion reactions in muonic molecules $^3,^4\text{He}\mu$, $^6,^7\text{Li}\mu$. There are also limiting estimations of nuclear fusion rates, which can be obtained in the experiments. For this experimental programme the intensive muon beams are required.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1992