

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P4-89-561

В.М.Быстрицкий, А.В.Кравцов*, Н.П.Попов*

**КИНЕТИКА ВОЗБУЖДЕННОГО МЕЗОВОДОРОДА
В СМЕСЯХ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ**

Направлено в "Журнал экспериментальной
и теоретической физики"

* Ленинградский институт ядерных исследований
АН СССР

1989

Изучение процессов, происходящих за короткое время девозбуждения мезоатомов водорода, представляет значительный интерес в мезоатомной физике. Этими процессами являются следующие: девозбуждение мезоатома в оже-переходах при соударениях с молекулами мишени и в радиационных переходах /1,2/, упругие соударения, ответственные за процесс термализации мезоатомов и их ускорение в процессах девозбуждения /3,4/ и, наконец, перехват мюонов из возбужденных состояний мезоводорода другими ядрами /5-7/. Наличие столь большого числа конкурирующих процессов обуславливает сложность экспериментального выделения каждого из них. К этому следует добавить, что скорости этих процессов высоки $> 10^{11} \text{ с}^{-1}$ (при плотности жидкого водорода), что затрудняет их экспериментальное изучение. В то же время развитие мезоатомного каскада зависит от исходных условий образования мезоатома /8/. Процессы прямой посадки мюонов на ядра с образованием мезоатома и перезарядки на этих ядрах мезоатомов изотопов водорода в возбужденных состояниях трудно различимы экспериментально.

В настоящей работе мы обсуждаем возможность экспериментального разделения этих процессов. В качестве примера рассматриваем смесь изотопов водорода и гелия. Мезоатомные процессы в водород-гелиевой смеси представляют интерес в связи с изучением проблемы мюонного катализа, сопровождаемого накоплением гелия в результате реакции синтеза ядер изотопов водорода и распада трития в представляющей наибольший интерес дейтерий-тритиевой смеси /9/. Для обеспечения наилучших условий реализации мюонного катализа в энергетических целях, т.е. для получения наибольшего числа циклов катализа, приходящихся на один мюон, следует сводить к минимуму возможную примесь гелия, накапливаемого в смеси D_2+T_2 .

Оценка условий, необходимых для обеспечения очистки гелия, определяется информацией о скоростях перехвата мюонов с мезоводорода на гелий и прямой посадки мюонов на ядра гелия. Что касается перехвата мюонов на ядра гелия с возбужденных мезоатомов изотопов водорода, то имеется исчерпывающая как теоретическая /10/, так и экспериментальная /II-14/ информация, позволяющая оценить допустимую примесь гелия, не влияющую на число циклов мезокатализа.

В то же время в отношении перехвата мюонов ядрами гелия с возбужденных мезоатомов изотопов водорода имеется лишь частичная экспериментальная /15,16/ и теоретическая /17,18/ информация. Столь же неоднозначным остается вопрос и о прямой посадке мюонов на ядра гелия. Представляется очень важным получение независимой экспериментальной информации об этих процессах.

Характеристикой процессов перехвата мюона с возбужденного мезоводорода на гелий и прямой посадки мюона на гелий может служить величина /II,16/

$$W = W_H W_O, \quad (I)$$

определяющая вероятность того, что мюон, остановившийся в смеси водорода и гелия, будет захвачен именно на водород и образовавшийся мезоводород достигнет своего основного состояния, не отдав мюон атому гелия. Эта величина зависит от концентрации примеси и плотности мишени. Вероятность посадки мюона на изотоп водорода может быть описана выражением

$$W_H = (1 + A C_{He})^{-1}, \quad (2)$$

где C_{He} - относительная концентрация гелия, A - отношение вероятностей посадки мюона на гелий и водород. Если воспользоваться

данными о посадке Γ -мезонов на водород, то $A = A_{\Gamma} = 1,84 / 19 /$, т.е. посадка на гелий примерно вдвое превышает посадку на водород.

Величина $W_0 \approx q_{1S}^{He}$, характеризующая заселенность основного состояния мезоводорода с учетом перехвата мюона гелием из возбужденных состояний мезоатома, определяется плотностью мишени, концентрацией примеси и, вообще говоря, энергией мезоатома в возбужденном состоянии. Значения W_0 находятся в результате решения системы кинетических уравнений, определяющих кинетику возбужденного мезоводорода с учетом каскадных переходов и перехвата мюона за время $\sim 10^{-11}$ с (при плотностях, близких к плотности жидкого водорода). Вообще говоря, нахождение W_0 является задачей решения системы дифференциальных уравнений большой размерности (≈ 14), в которой следует учитывать указанные выше конкурирующие процессы. Однако возможно упрощение, обусловленное высокими скоростями оже-девозбудений для $n > 5$ (n - главное квантовое число мезоводорода) в сравнении со скоростями перехвата мюона гелием. Полагая таким образом, что заселенность состояния с $n = 5$ мезоводорода отвечает исходной, т.е. $q_{1S}^{He} = 1$, задача упрощается (рис. 1) и сводится к решению системы уравнений существенно меньшей размерности ($n \approx 5$). Однако в этом случае необходимо решение многоканальной задачи с учетом связи каналов с целью нахождения скоростей перехвата.

Дальнейшим упрощением явилось вычисление скоростей перехвата мюона квазиклассическими методами /6,20/. Следуя методу, изложенному в работе /20/ для дейтерий-тритиевой смеси, мы применили его для водород-гелиевой смеси, как это сделано в работе /18/.

Однако, в отличие от /18/, в настоящей работе учитывается энергетическая зависимость скоростей прямой перезарядки, а также вычисляется заселенность основного состояния мезоводорода q_{1S}^{He} .

На рис. 2 приведены энергетические зависимости скоростей перехвата мюона $\lambda_{ex}^{(n)}$ с возбужденного мезоводорода на гелий для $n = 2$ и $n = 3$.

При решении системы кинетических уравнений (рис. 1) было сделано предположение, что скорости перехвата мюона из состояний с $n > 3$ такие же, как для $n = 3$. Для основного состояния использовались вычисленные в [10] скорости молекулярной перезарядки. Скорость шарковского девозбуждения $2s$ -состояния $\lambda_{ind} = 0,04 \psi \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ для энергии мезоатома $E = 0,04 \text{ эВ}$. При расчете для больших энергий, как и в работе [7], было принято, что $\lambda(2p \rightarrow 2s) = \frac{1}{3} \lambda(2s \rightarrow 2p)$, причем $\lambda(2p \rightarrow 2s) = 32 \psi \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ для $E = 0,5 \text{ эВ}$ и $\lambda(2s \rightarrow 2p) = 48 \psi \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ для $E = 1 \text{ эВ}$.

На рис. 3 приведены расчетные зависимости q_{1s}^{He} (полученные для системы $p_m + He$) от относительной концентрации гелия C_{He} для различных значений плотности смеси в пределах $0,01 \leq \psi \leq 1$. Сплошные кривые соответствуют энергии возбужденного мезоатома 1 эВ , а пунктирные — $0,04 \text{ эВ}$ ($T \approx 300 \text{ К}$). Видно, что в отличие от дейтерий-тритиевой смеси [7] здесь отсутствует заметная зависимость q_{1s}^{He} от E , что иллюстрируется также рис. 4, где приведена эта же зависимость для $C_{He} = 0,5$ и $\psi = 0,1, 1, 0, 0,05$. Очень слабая энергетическая зависимость q_{1s}^{He} (по сравнению с аналогичной зависимостью для $d-t$ смеси) обусловлена сравнительно малой скоростью перезарядки мезоводорода в метастабильном $2s$ -состоянии на гелии, примерно на порядок меньшей, чем в случае перезарядки на тритии.

Дело в том, что девозбуждение $2s$ -состояния, обусловленное шарковским $2s \rightarrow 2p$ переходом (с последующим $2p \rightarrow 1s$ переходом), имеет сильную энергетическую зависимость, характеризуемую почти

Рис. 1. Схема каскада $\rho\mu$ -атома в смеси H_2+He . Скорости переходов даны в ед. 10^{11} с^{-1} . Скорости штарковского девозбуждения λ_{ind} и $\lambda \equiv \lambda(2\rho \rightarrow 2S)$ обсуждаются в тексте; $\lambda_{ex}^{(1)} - \lambda_{ex}^{(5)}$ скорости перехвата мюонов от $\rho\mu$ -атомов к ядрам He.

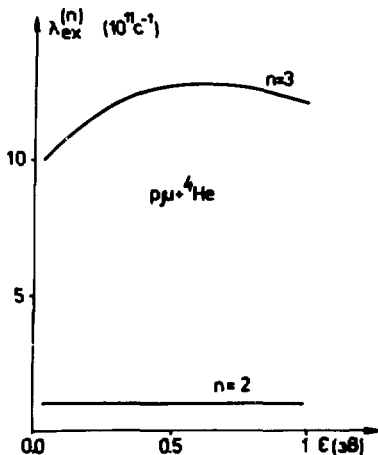
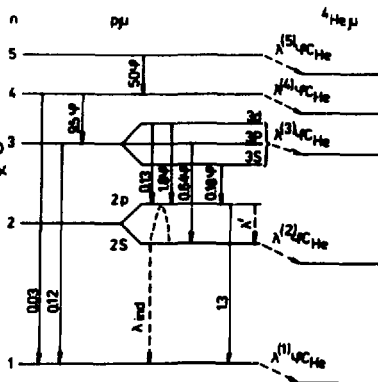


Рис. 2. Зависимости скорости перезарядки возбужденного $\rho\mu$ -атома на ядре He от энергии столкновения для главных квантовых чисел $n = 2, 3$.

100-кратным превышением скорости девозбуждения мезоатома при $\epsilon > 0,2$ эВ (величина лэмбовского $2p-2s$ расщепления) в сравнении со скоростью при $\epsilon < 0,2$ эВ. Однако при достаточно малой скорости перехвата мюона гелием от мезоводорода в $2s$ - состоянии указанное выше обстоятельство слабо сказывается на величине q_{1s}^{He} , что иллюстрируется рис. 3, 4. Сравнение результатов расчета q_{1s}^{He} (рис. 3, 4) с данными феноменологической обработки эксперимента /16/ (см. рис. 2 из работы /16/) показывает, что наблюдается некоторое превышение "экспериментальных" значений W_0 над расчетными q_{1s}^{He} . Это может быть обусловлено тем, что $A_{\mu} < A_{IT}$ (значения W_H больше соответствующих значений, использованных при обработке данных /16/), и, следовательно, согласно выражению (I), найденные значения W_0 несколько меньше расчетных. Сравнение расчетных данных (рис. 3) с экспериментальными /16/ приводит к тому, что $A_{\mu} = 1,25$ (сравнение q_{1s}^{He} с данными эксперимента при $\psi = 0,05$), т.е. посадка на водород и гелий примерно одинакова. Видно, что величина q_{1s}^{He} , извлекаемая из экспериментальных данных, очень чувствительна к величине A (уменьшение q_{1s}^{He} на 10% приводит к уменьшению A на 30%). Этот факт может быть использован с целью проверки механизма прямой посадки, который крайне важно правильно учитывать при исследовании мюонного катализа в смеси D_2+T_2 . Отсутствие значительной энергетической зависимости q_{1s}^{He} в сравнении с q_{1s} в смеси D_2+T_2 не позволяет исследовать вопрос о термализации возбужденного мезоводорода в водород-гелиевой смеси. Это, однако, является благоприятным обстоятельством для извлечения из экспериментальных данных величины W_H , поскольку исключается неопределенность, связанная с отсутствием информации об энергетическом распределе-

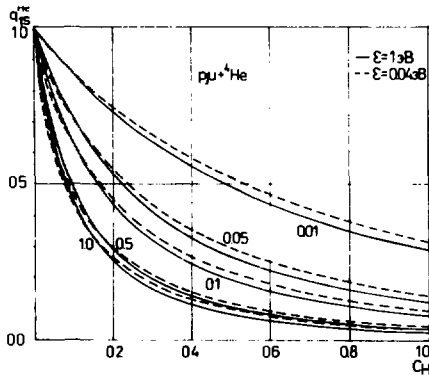
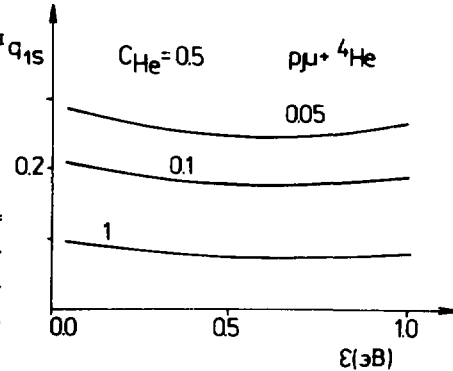


Рис. 3. Зависимость заселенности основного состояния мезоводорода q_{1s}^{He} от концентрации He для различных значений плотности смеси H_2+He . Сплошные линии соответствуют энергии столкновения 1 эВ, а пунктирные - 0,04 эВ. Значения плотности смеси $H_2+{}^4He$ (в единицах плотности жидкого водорода $N_0 = 4,25 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$) приведены у соответствующих кривых.

Рис. 4. Энергетическая зависимость заселенности основного состояния мезоводорода для смеси $H_2+{}^4He$ при концентрации ${}^4He C_{He} = 0,5$ и различных значениях плотности смеси. Значения приведены у кривых.



нии мезоатомов водорода. При $C_{He} = 10^{-3} - 10^{-2}$ и $\psi \approx 0,9$ (1500 ат) можно пренебречь прямой посадкой мюонов на гелий (т.е. $W_H = 1$) и определить величину W_0 .

Экспериментальные данные о величине W_0 , определенные при нескольких значениях C_{He} в указанном диапазоне ($10^{-3} - 10^{-2}$), в принципе, позволяют уточнить расчетные скорости перехвата мюона на гелий из возбужденных состояний мезоводорода. Далее, повншая концентрацию гелия в пределах $C_{He} \approx 0,1 - 0,5$, можно найти величину W_H , используя полученные выше значения W_0 . С помощью соотношения (2) можно найти значение λ с точностью $\sim 2 - 4\%$. Следует отметить, что проведение экспериментов при больших концентрациях гелия ($C_{He} = 0,3 - 0,5$) и малых значениях плотности водород-гелиевой смеси ($\psi \approx 0,05 - 0,1$) является, безусловно, целесообразным для получения более точной информации о скоростях перехвата мюона с возбужденного мезоводорода на гелий. Согласно нашим оценкам перехват мюона из возбужденных состояний мезоводорода на гелий приводит к заметному выбыванию мюонов из цепочки мюонного катализа. Поэтому для реализации эффективного dt -синтеза необходимо учитывать этот процесс (наряду с перехватом мюона из основного состояния) при оценке допустимой примеси гелия в смеси D_2+T_2 . Проводя этот эксперимент для смесей H_2+He , D_2+He и T_2+He , можно извлечь информацию о величине λ для каждого из изотопов водорода и, следовательно, определить изотопическую зависимость вероятности прямой посадки мюона на водород. Следует отметить, что эксперименты с использованием дейтерия и трития являются особенно информативными по двум причинам: во-первых, в этом случае не требуется (как в случае смеси H_2+He) использование пробного газа (He, Ar), поскольку экспериментальное определе-

ние характеристик мезоатомных процессов основано на анализе выходов и временных распределений продуктов реакций dd , tt -синтеза; во-вторых, в этих смесях появляется возможность определить скорость перехвата мюона из основного состояния мезоводорода на гелий даже при малых концентрациях гелия.

Проведение таких экспериментов в газовой среде более предпочтительно, т.к. позволяет избежать возможных неопределенностей, связанных с неточным знанием концентрации гелия в жидком водороде.

Резюмируя, следует сказать, что проведение предложенного комплекса экспериментов позволит получить весьма важную информацию, необходимую для корректной интерпретации данных по исследованию мюонного катализа реакций ядерного синтеза в смеси D_2+T_2 .

Литература

1. M. Leon, H.A. Bethe - Phys. Rev., 1962, 127, 636.
2. A.P. Bukhvostov, N.P. Popov - Sov. Phys. - JETP, 1982, 55, 13.
3. L. Bracci, G. Fiorentini - Nuovo Cim., 1978, 43A, 9.
4. L.I. Menshikov - Muon Catalyzed Fusion 1988, 2, 173.
5. S.S. Gerstein, L.I. Ponomarev - In: Muon Physics (eds. V. Hughes and C.S. Wu), Academic Press, N.Y., 1975, v. 3, p. 141.
6. L.I. Menshikov, L.I. Ponomarev - Z. Phys., 1986, D2, 1.
7. A.V. Kravtsov, A.I. Mikhailov, N.P. Popov - Phys. Lett., 1988, A132, 124.
8. V.V. Balashov, V.K. Dolinov, G.Ya. Korenman et al. - Muon Catalyzed Fusion, 1988, 2, 105;
G.Ya. Korenman, V.P. Popov - Muon Catalyzed Fusion, Sanibel,

- Island, (eds. S.Jones, J.Rafelski, H.Monkhorst), Amer.Inst. of Phys., N.Y., 1989, p. 145.
9. L.I.Ponomarev - Muon Catalyzed Fusion, 1988, 3, 629.
 10. N.P.Popov - Muon Catalyzed Fusion, 1988, 2, 207;
Proceedings of the International Symposium of Muon and Pion Interactions with Matter. Dubna, June 30 - July 4 1987, p. 337.
 11. V.M.Bystritsky, V.P.Dzhelepov, V.I.Petrukhin et al.
-Zh.Eksp.Teor.Fiz., 1983, 84, 1257 (English transl.: Sov. Phys.JETP, 1983, 57, 728).
 12. A.A.Vorobyov - Muon Catalyzed Fusion, 1988, 2, 17.
 13. A.J.Caffrey et al.-Muon Catalyzed Fusion, 1987, 1, 53.
 14. T.Matsuzaki, K.Ishida, K.Nagamine et al.-Muon Catalyzed Fusion, 1988, 2, 217.
K.Nagamine, T.Matsuzaki, K.Ishida et al.-Muon Catalyzed Fusion, Sanibel, Island (eds. S.Jones, J.Rafelski, H.Monkhorst), Amer.Inst.of Physics, N.Y., 1989, p. 23.
 15. A.Bertin, M.Bruschi, M.Capponi et al.-Muon Catalyzed Fusion, Sanibel, Island, (eds. S.Jones, J.Rafelski, H.Monkhorst) Amer.Inst.of Physics, N.Y., 1989, p. 161.
 16. M.Bubak, V.M.Bystritsky -Preprint JINR, E1-86-107, Dubna, 1986.
 17. A.V.Kravtsov, N.P.Popov - Z.Phys.A: At.Mol.Clusters, 1987, 6, 61.
A.V.Кравцов, А.И.Михайлов, Н.П.Попов - Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, с.377.
 18. A.V.Кравцов, А.И.Михайлов, Н.П.Попов - ЖЭТФ, 1989, 96, 437-444.

19. В.И.Петрухин, В.М.Суворов—ИЭТФ, 1976, 70, 1145.
20. A.Kravtsov, A.Mayorov, A.Mikhailov et al.—Muon Catalyzed Fusion 1988, 2, 183.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 июля 1989 года.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

В.М.Быстрицкий, А.В.Кравцов, Н.П.Попов.

P4-89-561

Кинетика возбужденного мезоводорода
в смесях изотопов водорода и гелия

Рассмотрен каскад возбужденного мезоводорода в смеси изотопов водорода с гелием. Предложен метод определения скоростей перехвата мюона с возбужденного мезоводорода на гелий, а также вероятности прямой посадки мюона на изотопы водорода.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1989

Перевод авторов

Bystritsky V.M., Kravtsov A.V., Popov N.P.

P4-89-561

Kinetics of the Excited Muonic Hydrogen
in the Mixtures of Hydrogen Isotopes and Helium

Deexcitation of the excited muonic hydrogen in the mixture of hydrogen isotopes and helium is considered. The method is proposed which allows one to determine the rates of the muon transfer from the excited muonic hydrogen to helium nuclei, as well as the probability of the direct muon atomic capture by nuclei of hydrogen isotopes.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1989

16 коп.

Редактор Е.К.Аксенова. **Макет** Р.Д.Фоминной.

Подписано в печать 29.08.89.

Формат 60x90/16. **Офсетная печать.** **Уч.-изд.листов** 1,07.

Тираж 425. **Заказ** 42482.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.
Дубна Московской области.