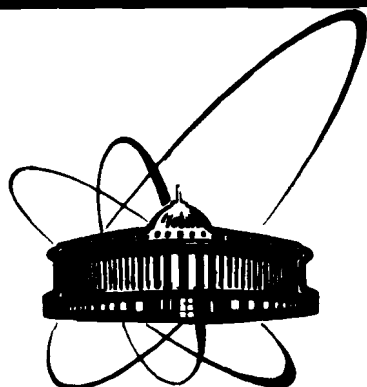


89-561



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

Б 955

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 $\geq 10^{11} \text{с}^{-1}$ (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 окрестях перехвата мюонов с мезоводорода на гелий и прямой посадки мюонов на ядра гелия. Что касается перехвата мюонов на ядра гелия с невозбужденных мезоатомов изотопов водорода, то имеется исчерпывающая как теоретическая /10/, так и экспериментальная /11-14/ 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 /11,16/

$$W = W_H W_0, \quad (1)$$

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 Π^- -мезонов на водород, то $A = A_{\pi} = 1,84$ /19/, т.е. посадка на гелий примерно вдвое превышает посадку на водород.

Величина $W_0 \equiv q_{1S}^{He}$, 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-девозбуждений 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-третиевой 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 штарковского девозбуждения $2s$ -состояния $\lambda_{ind} = 0,04 \varphi \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ 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 $\lambda(2p \rightarrow 2s) = 32 \varphi \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ для $E = 0,5 \text{ эВ}$ и $\lambda(2s \rightarrow 2p) = 48 \varphi \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ для $E = 1 \text{ эВ}$.

На рис. 3 приведены расчетные зависимости q_{1s}^{He} (полученные для системы $\mu\text{H} + \text{He}$) от относительной концентрации гелия C_{He} для различных значений плотности смеси в пределах $0,01 \leq \varphi \leq 1$. Сплошные кривые соответствуют энергии возбужденного мезоатома 1 эВ, а пунктирные - 0,04 эВ ($T \approx 300 \text{ K}$). 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 $\varphi = 0,1, 1,0, 0,05$. 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 штарковским $2s \rightarrow 2p$ переходом (с последующим $2p \rightarrow 1s$ переходом), имеет сильную энергетическую зависимость, характеризуемую почти

Рис. 1. Схема каскада μH -атома в смеси $\text{H}_2 + \text{He}$. Скорости переходов даны в ед. 10^{11} с^{-1} . Скорости штарковского девозбуждения λ_{ind} и $\lambda' \equiv \lambda(2p \rightarrow 2s)$ обсуждаются в тексте; $\lambda_{ex}^{(1)} - \lambda_{ex}^{(5)}$ скорости перехвата мюонов от μH -атомов к ядрам He.

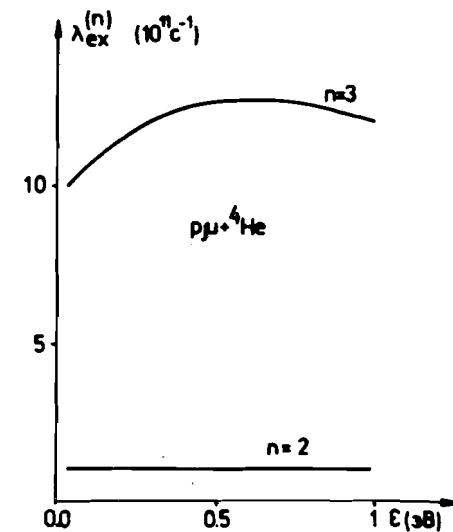
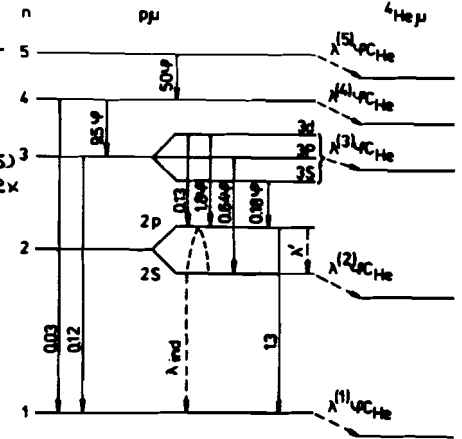


Рис. 2. Зависимости скорости перезарядки возбужденного μH -атома на ядре He от энергии столкновения для главных квантовых чисел $n = 2, 3$.

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 $A_M < A_T$ (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 $A_M = 1,25$ (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-

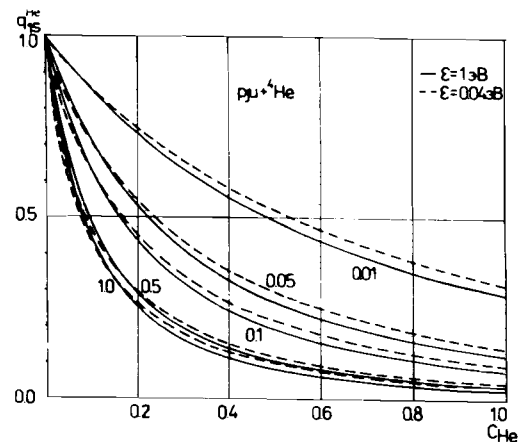


Рис. 3. Зависимость заселенности основного состояния мезоводорода q_{1s}^{He} от концентрации He для различных значений плотности смеси H_2+He . Сплошные линии соответствуют энергии столкновения 1 эВ, а пунктирные - 0,04 эВ. Значения плотности смеси H_2+^4He (в единицах плотности жидкого водорода $N_0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

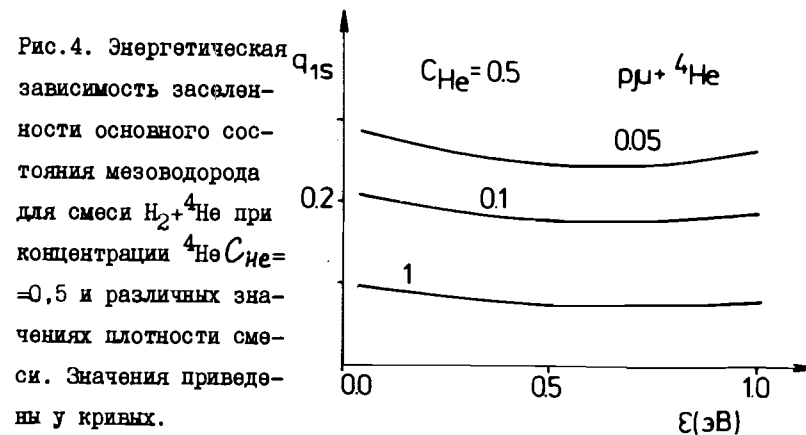


Рис. 4. Энергетическая зависимость заселенности основного состояния мезоводорода для смеси H_2+^4He при концентрации 4He $C_{He} = 0,5$ и различных значениях плотности смеси. Значения приведены у кривых.

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, повышая 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 A 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 A 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.Dzheleпов, 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.В.Кравцов, А.И.Михайлов, Н.П.Попов-Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, с.377.
 18. А.В.Кравцов, А.И.Михайлов, Н.П.Попов -ЖЭТФ, 1989, 96, 437-444.
 19. В.И.Петрухин, В.М.Суворов-ЖЭТФ, 1976, 70, II45.
 20. A.Kravtsov, A.Mayorov, A.Mikhailov et al.-Muon Catalyzed Fusion 1988, 2, 183.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 июля 1989 года.