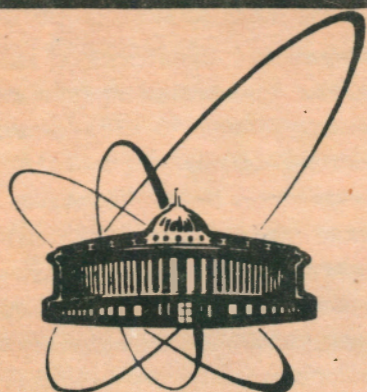


92-327



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

Д15-92-327

В.Б.Бруданин, В.М.Быстрицкий, Я.Ваврыщук,
В.М.Гребенюк, В.Г.Егоров, А.К.Качалкин,
Я.Рак, В.А.Столупин, И.А.Ютландов

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТУ "ПРОВЕРКА
ГИПОТЕЗЫ О СУЩЕСТВОВАНИИ "БЕЛЫХ"
И "ЧЕРНЫХ" p μ -АТОМОВ"

Введение. Физическое обоснование

Исследование мю-атомных и мю-молекулярных процессов в смесях изотопов водорода с различными химическими элементами представляет самостоятельный раздел физики экзотических атомов. С теоретической точки зрения интерес к изучению данных процессов обусловлен тем обстоятельством, что в столкновениях мю-атомов водорода с различными элементами в чистом виде реализуется квантово-механическая задача трех тел, взаимодействующих по закону Кулона. Картина мю-атомных и мю-молекулярных процессов, происходящих после остановки отрицательного мюона в смесях типа $H_2 + Z$, представляет собой многоступенчатую и разветвленную цепь процессов, существенно важных как для последующего ядерного синтеза протонов водорода, так и для исследования фундаментальных реакций слабого взаимодействия: $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$, $\mu^- + d \rightarrow n + p + \nu_\mu$. Поэтому для правильной интерпретации экспериментов по исследованию мюонного катализа ядерных реакций синтеза изотопов водорода, а также опытов по изучению фундаментальных реакций слабого взаимодействия необходимо иметь информацию о характеристиках одного из конкурирующих процессов - процесса перехвата мюонов от мю-атомов изотопов водорода к ядрам примеси с $Z > 1$, находящимся в водороде. Вкратце картина процессов, происходящих после остановки мюона в смеси $H_2 + Z$, является следующей. Мюон, попадая в смесь $H_2 + Z$, испытывает потери энергии за счет механизма адиабатической ионизации и захватывается атомами H и Z, образуя $p\mu$ - и $Z\mu$ -атомы в высоковозбужденном состоянии. Следующим этапом является девозбуждение мюонных атомов за счет Оже- и радиационных переходов. Согласно экспериментам с π -мезонами, время девозбуждения $p\mu$ -атомов в жидком водороде составляет 10^{-12} с. Мю-атомы изотопов водорода, находящиеся в основном состоянии ($1s$) с начальной энергией ~ 1 эВ, благодаря малым размерам (боровский радиус $d\mu$ -атома в основном состоянии составляет $0,27 \times 10^{-10}$ см) и электронейтральности свободно проникают через электронную оболочку других атомов и молекул и приближаются к их ядрам на расстояния порядка мезоатомной единицы длины $a_\mu = 2,56 \times 10^{-11}$ см. При таком сближении могут происходить следующие процессы:

а) упругие столкновения мюонных атомов изотопов водорода с протонами, дейтронами, тритонами и сложными ядрами,

б) переходы между уровнями сверхтонкой структуры мю-атомов изотопов водорода,

в) перехват мюонов от легкого изотопа водорода к тяжелому (реакции изотопного обмена),

г) перехват мюонов от ядер изотопов водорода к ядрам элементов с $Z > 1$,

д) образование мюонных молекул $p\mu$, $p\mu$, $p\mu$, $dd\mu$, $dt\mu$, $tt\mu$.

Ниже мы подробно изложим экспериментальную ситуацию, сложившуюся к настоящему времени в области исследования процесса перехвата мюонов от мю-атомов изотопов водорода к ядрам элементов с $Z > 1$, и приведем обоснование необходимости дальнейших исследований в этом направлении. Следует отметить, что метод определения параметров процесса перехвата мюонов, как правило, основан на анализе выходов и временных распределений вторичных частиц: электронов от распада мюонов, γ -квантов мезорентгеновского излучения $Z\mu$ -атомов, возникающего в результате перехвата мюонов от мю-атомов изотопов водорода к ядрам с $Z > 1$, а также продуктов ядерного синтеза изотопов водорода. Характерные времена этих процессов сравнимы с временем жизни свободного мюона ($\tau_\mu = 2,2 \times 10^{-6}$ с), поэтому регистрация вторичных частиц обычно производится в интервале 5-10 мкс относительно момента остановки мюона в веществе.

Временные распределения γ -квантов мезорентгеновского излучения $Z\mu$ -атомов и электронов от распада мюонов в смеси $H_2 + Z$ описываются следующими выражениями:

$$\frac{dn_\gamma}{dt} = N \exp\{-\lambda t\}, \quad \lambda = \lambda_0 + \lambda_{p\mu} C_H \varphi + \lambda_Z^p C_Z \varphi, \quad (1)$$

$$\frac{dn_e}{dt} = \left[\lambda_0 - \frac{\lambda_0 \lambda_{p\mu} C_H \varphi}{\lambda - \lambda_0} - \frac{\lambda_Z^p C_Z \lambda_0' \varphi}{\lambda - \lambda_0' - \lambda_{cap}^Z} \right] \exp\{-\lambda t\} + \left[\frac{\lambda_0 \lambda_{p\mu} C_H \varphi}{\lambda - \lambda_0} \right] \exp\{-\lambda_0 t\} + \left[\frac{\lambda_Z^p C_Z \lambda_0' \varphi}{\lambda - \lambda_0' - \lambda_{cap}^Z} \right] \exp\{-(\lambda_0' + \lambda_{cap}^Z) t\}, \quad (2)$$

где B - нормировочная константа; λ_0 - скорость распада свободного мюона ($\lambda_0 = 0,455 \times 10^6 \text{ с}^{-1}$); $\lambda_{\text{pp}\mu}$ и λ_Z^p - скорости образования $\text{pp}\mu$ -молекул и перехвата мюонов от $\text{p}\mu$ -атомов к ядрам с $Z > 1$ соответственно, приведенные к плотности жидкого водорода; C_H и C_Z - относительные атомарные концентрации водорода и примеси с $Z > 1$ соответственно; φ - плотность смеси $\text{H}_2 + Z$, приведенная к атомарной плотности жидкого водорода ($n_0 = 4,25 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$); λ_0' - скорость распада мюона на орбите $Z\mu$ -атома; λ_{cap}^Z - скорость поглощения мюона ядром с $Z > 1$. Совместное фитирование временных распределений γ -квантов мезорентгеновского излучения и электронов от распада мюонов позволяет однозначно определить искомую величину λ_Z^p .

До настоящего времени выполнено большое количество как экспериментальных, так и теоретических работ, посвященных исследованию процесса перехвата мюонов от мю-атомов изотопов водорода к ядрам Z . Особого внимания заслуживает рассмотрение недавно выполненных экспериментов^{/1,2,3/} со смесью $\text{H}_2 + \text{SO}_2$, результаты которых весьма удивительны и пока не имеют объяснения.

Эксперименты^{/1,2,3/} были выполнены на мезонной фабрике PSI со смесью $\text{H}_2 + \text{SO}_2$ при полном давлении смеси 13,3 атм и молекулярной концентрации SO_2 , равной 0,4%. В результате анализа временных и энергетических распределений γ -квантов мезорентгеновского излучения $\text{O}\mu$ - и $\text{S}\mu$ -атомов было обнаружено, что:

1) временное распределение γ -квантов $\text{S}\mu$ -атомов описывается одной экспонентой с характерным временем $\tau_S = 110 \text{ нс}$;

2) временное распределение γ -квантов $\text{O}\mu$ -атомов описывается суперпозицией двух экспонент - быстрой ($\tau_0^1 = 41 \text{ нс}$) и медленной ($\tau_0^2 = 110 \text{ нс}$).

Наличие двух компонент во временном спектре мезорентгеновского излучения $\text{O}\mu$ -атомов никак не может быть объяснено с точки зрения общепринятого механизма процесса перехода мюонов от $\text{p}\mu$ -атомов (находящихся в основном состоянии) к ядрам S и O. Согласно данному механизму перехвата временные распределения γ -квантов мезорентгеновского излучения $\text{S}\mu$ - и $\text{O}\mu$ -атомов должны описываться одной экспонентой с показателем Λ , равным

$$\Lambda = \lambda_0 + C \frac{\rho}{2\rho_0} (2\Lambda_0 + \Lambda_S) + \lambda_{\text{pp}\mu} C_H \varphi, \quad (3)$$

где C - относительная молекулярная концентрация SO_2 ; ρ - молекулярная плотность смеси $\text{H}_2 + \text{SO}_2$ в мишени; ρ_0 - молекулярная плотность жидкого водорода ($\rho_0 = n_0/2$); Λ_0 и Λ_S - скорости перехвата мюонов от $\text{p}\mu$ -атомов к ядрам кислорода и серы, приведенные к плотности жидкого водорода.

Получив столь неожиданный результат, авторы работ^{/1,2,3/} высказали гипотезу о возможности существования двух типов $\text{p}\mu$ -атомов - "белых" и "черных". "Белые" - это долгоживущие $\text{p}\mu$ -атомы, от которых возможен перехват мюонов как к ядрам серы (со скоростью Λ_S), так и к ядрам кислорода (со скоростью Λ_0). "Черные" - $\text{p}\mu$ -атомы, от которых возможен перехват мюонов только к ядрам кислорода, причем со скоростью гораздо большей, чем Λ_0 (по мнению авторов, "черные" мю-атомы могут соответствовать некоторому неизвестному промежуточному состоянию системы - мюон-химическому комплексу).

Кроме отмеченного факта имеются и другие экспериментальные наблюдения, также требующие объяснения.

1) Отношение скоростей перехвата мюонов от $\text{p}\mu$ -атомов к ядрам серы и кислорода $k = \Lambda_S/\Lambda_0$, измеренное в опытах со смесью $\text{H}_2 + \text{SO}_2$, отличается от отношения ранее измеренных и вычисленных значений скоростей перехвата^{/4/}.

2) Отсутствует вторая компонента во временном распределении γ -квантов мезорентгеновского излучения $\text{S}\mu$ -атомов.

3) Результаты экспериментов по измерению скоростей перехвата мюонов от $\text{p}\mu$ -атомов (находящихся в основном состоянии) к ядрам $Z > 1$, полученные в разных лабораториях и с использованием различных методик^{/5-11/}, резко различаются между собой. К этому можно добавить две группы измерений скорости перехвата мюонов от $\text{p}\mu$ -атомов к ядрам ${}^4\text{He}$, результаты которых отличаются между собой в 2,5 раза^{/12-14/}.

4) Отношение вероятностей атомного захвата мюонов $A(\text{H}_2/\text{Ar})$ в смеси $\text{H}_2 + \text{Ar}$ существенно меньше соответствующей величины для пионов^{/11/} и не согласуется также с модельными представлениями. Такой же вывод справедлив и для величины A , измеренной в опыте со смесью $\text{H}_2 + \text{SO}_2$.

5) Во временном распределении γ -квантов мезорентгеновского излучения $\text{Ne}\mu$ -атомов, возникающего в результате перехвата мюонов

от $\rho\mu$ -атомов к ядрам Ne в смеси $H_2 + Ne$, наблюдаются две компоненты^{/15/}, в то время как в смеси $H_2 + Ne + Ar$ - одна^{/11,15/}.

Авторы работ^{/1,2,3,15/} считают, что все перечисленные особенности могут иметь место, если предположить следующее: $\rho\mu$ -атомы (находящиеся в основном состоянии) отличаются между собой по "цвету" ("белые" и "черные"), а следовательно, взаимодействие их с другими атомами носит различный характер.

Данная гипотеза имеет право на существование только в одном случае - в случае отсутствия каких-либо методических неопределенностей, возникающих при постановке такого типа экспериментов.

Рассмотрим в качестве примера постановку и анализ результатов экспериментов со смесью $H_2 + SO_2$ ^{/1,2,3/}. По нашему мнению, одной из причин появления короткоживущей компоненты во временном распределении γ -квантов мезорентгеновского излучения $O\mu$ -атомов является диффузия $\rho\mu$ -атомов (образующихся вблизи стенок мишени в слое толщиной, равной длине диффузии) к стенкам мишени с последующим перехватом мюонов от $\rho\mu$ -атомов ядрами кислорода (в эксперименте^{/1/} использовалась мишень из нержавеющей стали, следовательно, ее внутренняя поверхность всегда была покрыта окисной пленкой Fe_2O_3). Для условий^{/1,2,3/}, согласно нашим оценкам, время диффузии $\rho\mu$ -атомов до стенок мишени составляет 50 нс, что практически совпадает с измеренным характерным временем короткоживущей компоненты мезорентгеновского излучения. При таком рассмотрении становится понятным отсутствие короткоживущей компоненты во временном распределении мезорентгеновского излучения $S\mu$ -атомов. Что касается амплитуды данной компоненты, то оценка ее величины также согласуется с результатами эксперимента.

Следует обратить внимание еще на одно обстоятельство. В опытах^{/1,2,3/} перехват мюонов от $\rho\mu$ -атомов (находящихся в основном состоянии) к ядрам O и S исследовался реально в надтепловой области ($\rho\mu$ -атомы не термализованы), т.к. время термализации $\rho\mu$ -атомов для данных экспериментальных условий составляет 200 нс. Это обстоятельство вносит дополнительную неопределенность как в интерпретацию полученных данных, так и делает не совсем корректным сравнение их с результатами других экспериментов. С целью однозначной проверки гипотезы существования двух типов $\rho\mu$ -атомов

("белых" и "черных"), а также для проверки правильного описания механизма перехвата необходимо, в первую очередь, провести исследования со смесью $H_2 + SO_2$ при таких условиях, при которых вклад от процесса диффузии $\rho\mu$ -атомов к стенкам мишени был бы пренебрежимо мал, а также было бы мало время термализации $\rho\mu$ -атомов (по сравнению с характерными временами исследуемого процесса). Реализация таких условий становится возможной в случае использования мишени, заполненной смесью $H_2 + SO_2$ под высоким давлением - $P \geq 100$ атм.

В связи с этим нами предлагается следующая постановка эксперимента.

Экспериментальная установка

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки, расположенной на мюонном канале в низкофоновой лаборатории. Сцинтилляционные детекторы 1, 2, 3 и 4 служат для выделения акта остановки мюона в объеме мишени. Газовая мишень M расположена внутри полого детектора 4 и представляет собой цилиндр из нержавеющей стали диаметром 70 мм, длиной 85 мм и с толщиной стенок 2 мм. Регистрация γ -квантов мезорентгеновского излучения $S\mu$ - или $O\mu$ -атомов ($E_{S\mu} = 519$ кэВ и $E_{O\mu} = 133$ кэВ) осуществляется с помощью Ge(Li)-детектора объемом 100 см³. Регистрация электронов от распада мюонов производится детектором 4. Сигнал остановки мюона 1234 запускает ворота длительностью 10 мкс, в течение которых производится регистрация γ -квантов и электронов.

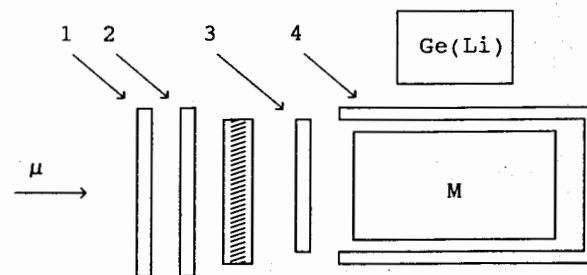


Рис. 1. Экспериментальная установка

Условия проведения опытов

Предполагается проведение двух экспозиций:

- 1) с мишенью, заполненной смесью $H_2 + SO_2$ под давлением 120 атм (молекулярная концентрация SO_2 составляет 4×10^{-5});
- 2) с вакуумированной мишенью (фоновый опыт).

Метод измерения

Метод измерения скоростей перехватов мюонов от μ -атомов к ядрам S и O основан на аппроксимации временных распределений зарегистрированных γ -квантов мезорентгеновского излучения $S\mu$ - и $O\mu$ -атомов и электронов от распада мюонов выражениями вида (1) и (2). Следует отметить, что совместный анализ этих распределений позволит определить парциальные скорости перехвата мюонов от μ -атомов к ядрам серы и кислорода.

Статистика

При интенсивности мюонного пучка $I_\mu = 10^5 \text{ с}^{-1}$ число остановок мюонов в объеме мишени, заполненной смесью $H_2 + SO_2$ под давлением 120 атм, (согласно параметрам мюонного пучка) составит $N_\mu = 4 \times 10^3$ мюон/с.

Выходы γ -квантов K_α -серии $O\mu$ - и $S\mu$ -атомов (в расчете на одну остановку мюона) для приведенных экспериментальных условий ($C = 4 \times 10^{-5}$, $\rho/\rho_0 \approx 0,16$) можно определить как

$$\eta_\gamma^{O\mu} \approx K_1 K_3 \epsilon_\gamma^1 \left(\frac{C\rho}{2\rho_0} \right) 2 \frac{\Lambda_0}{\Lambda} \approx 5 \times 10^{-4}, \quad (4)$$

$$\eta_\gamma^{S\mu} \approx K_2 K_4 \epsilon_\gamma^2 \left(\frac{C\rho}{2\rho_0} \right) \frac{\Lambda_s}{\Lambda} \approx 1,5 \times 10^{-4}, \quad (5)$$

где $K_1 = 0,6$ и $K_2 = 0,8$ - коэффициенты прохождения γ -квантов с энергиями 133 кэВ и 519 кэВ соответственно через стенки мишени;

$K_3 \approx K_4 \approx 0,8$ - относительная интенсивность K_α -линии $O\mu$ - и $S\mu$ -атомов; $\epsilon_\gamma^1 = 3,3 \times 10^{-3}$ и $\epsilon_\gamma^2 = 1,2 \times 10^{-3}$ - значения эффективностей регистрации γ -квантов K_α -линии $O\mu$ - и $S\mu$ -атомов (по фотопику); $\Lambda_0 = 8 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ и $\Lambda_s = 10^{11} \text{ с}^{-1}$ - скорости перехвата мюонов от μ -атомов к ядрам кислорода и серы, взятые из работы [11]; $\Lambda = 1,6 \times 10^6 \text{ с}^{-1}$ - скорость исчезновения μ -атома (см. выражение (3)).

Для подавления фона случайных совпадений и фона, связанного с остановками мюонов в стенках мишени, до уровня 5% используются задержанные совпадения (в течение длительности ворот 10 мкс) сигналов с γ -детектора и с детектора электронов (детектор 4).

В этом случае экспериментальные выходы γ -квантов мезорентгеновского излучения $O\mu$ - и $S\mu$ -атомов можно определить как

$$Y_{\gamma e}^{O\mu} = Y_\gamma^{O\mu} \epsilon_e \approx 3 \times 10^{-4}, \quad (6)$$

$$Y_{\gamma e}^{S\mu} = Y_\gamma^{S\mu} \epsilon_e \approx 0,9 \times 10^{-4}, \quad (7)$$

где $\epsilon_e = 0,6$ - эффективность регистрации электронов от распада мюонов детектором 4. Число зарегистрированных γe -совпадений за 1 час составит

$$N_{\gamma e}^{O\mu} = N_\mu Y_{\gamma e}^{O\mu} \times 3,6 \times 10^3 \approx 4,3 \times 10^3, \quad (8)$$

$$N_{\gamma e}^{S\mu} = N_\mu Y_{\gamma e}^{S\mu} \times 3,6 \times 10^3 \approx 1,3 \times 10^3. \quad (9)$$

Если во временном распределении γ -квантов $O\mu$ -атомов действительно появляются две компоненты (причем вклад быстрой компоненты составляет 5%), то для определения временной константы быстрой компоненты с точностью 10% необходимо иметь полную статистику в спектре $\sim 10^5$. Из этого следует, что время набора статистики на пучке мюонов составляет 30 ч. Длительность фоновой экспозиции составит 10 ч.

Литература

1. H. Schneuwly // Muon Catalyzed Fusion 4 (1989) 877.
2. H. Schneuwly // International workshop on exotic atoms in condensed matter, Erice-Sicily, 1990.
3. F. Mulhauser et al. // Herbsttagung der SPG/SSP 63 (1990) 545.
4. G. Fiorentini and G. Torelli // Nuovo Cimento 36A (1976) 317.
5. F. Bienz et al. // B: At. Mol. Opt. Phys. B21 (1988) 2725.
6. R. Jacot-Guillarmod et al. // Phys. Rev. A38 (1988) 6151.
7. A. Placci et al. // Nuovo Cimento A52 (1967) 1247.
8. G. Backenstoss et al. // Phys. Lett. B36 (1971) 422.
9. E. Iacopini et al. // Nuovo Cimento A67 (1982) 201.
10. H. Daniel et al. // Nucl. Phys. A254 (1980) 409.
11. A. Alberigi Quaranta et al. // Nuovo Cimento B47 (1967) 93.
12. В.М. Быстрицкий и др. // ЖЭТФ 84 (1983) 1257.
13. R. Jacot-Guillarmod et al. // Phys. Rev. A39 (1989) 387.
14. H.P. von Arb et al. // Muon Catalyzed Fusion 4 (1989) 61.
15. R. Jacot-Guillarmod et al. // Herbsttagung der SPG/SSP 63 (1990) 543.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 июля 1992 года.

Бруданин В.Б. и др.

Д15-92-327

Предложения по эксперименту "Проверка гипотезы о существовании "белых" и "черных" μ -атомов"

Работа посвящена анализу результатов эксперимента по исследованию перехвата мюонов от μ -атомов к ядрам кислорода и серы в смеси $H_2 + 0,4\% SO_2$, выполненного швейцарской группой на мезонной фабрике PSI. Сделанный авторами рассматриваемой работы вывод о существовании различных типов ("цветных") μ -атомов ставится нами под сомнение из-за неучета ряда сопутствующих физических процессов, которые могут имитировать наблюдаемый эффект. С целью проверки гипотезы существования "цветных" μ -атомов предлагается постановка эксперимента, в которой влияние сопутствующих процессов сведено к минимуму.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1992

Brudanin V.B. et al.

D15-92-327-

Project of the Experiment to Test the Hypothesis on Existence of "White" and "Black" μ -Atoms

This article is dedicated to the analysis of the experiment on the investigation of the muon transfer from μ -atom to oxygen and sulphur nuclei in the $H_2 + 0,4\% SO_2$ mixture performed by Swiss group on the meson factory PSI. We put under doubt the conclusion of the authors of the considered article about existence of the different types of μ -atoms ("coloured") because they didn't take into account a number of the accompanying physical processes which imitate the observed effect. With the purpose of the checking the hypothesis of the existence of "coloured" μ -atoms we propose the experiment in which the influence of the accompanying processes is minimal.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1992