

ОБРАЗОВАНИЕ МЮОННОЙ МОЛЕКУЛЫ НЕ ПРИ ОСТАНОВКЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ МЮОНОВ В СМЕСИ НЕОНА И ВОДОРОДА

*Г.Ф.Бинько, Ю.П.Добрецов, В.Н.Гребенев, Ю.Б.Гуров,
В.Г.Кириллов-Угарисов, А.А.Малолетнев, А.Л.Михаэляч, А.Л.Пичугов*

*Московский инженерно-физический институт
115409 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 15 апреля 1993 г.

На установке с газовой мишенью, заполненной чистым неоном и смесями $\text{Ne} + \text{H}_2$, μSR -методом измерена остаточная поляризация отрицательных мюонов при комнатной температуре в поперечном магнитном поле 200 Гс. В чистом неоне (24 атм) прецессия поляризации на мюонной частоте не наблюдалась, а в смеси $\text{Ne}(24 \text{ атм}) + \text{H}_2(16 \text{ атм})$ измеренный коэффициент асимметрии составил $(0,59 \pm 0,09)\%$. Результаты объясняются образованием мюонной молекулы HF и свидетельствуют о возможности использования поляризованных отрицательных мюонов для изучения быстропротекающих физико-химических процессов в газовой фазе.

Мюонный (μSR) метод широко и успешно применяется для изучения свойств вещества и динамики химических взаимодействий (см., например, [1] и ссылки там). Однако практически все экспериментальные работы были выполнены только с использованием положительно заряженных мюонов, что ограничивает возможности метода исследованием взаимодействий со средой легкого аналога атома водорода или его иона. Применение отрицательных мюонов позволило бы существенно расширить круг элементов, так как при захвате μ^- атомом с зарядом ядра Z в среде образуется одиночный мюонный атом или ион, являющийся химическим аналогом атома с порядковым номером $Z - 1$ [2]. Известны попытки использования $\mu^- \text{SR}$ -метода для исследования химических реакций в конденсированных средах [3]. Однако из-за неконтролируемой скорости процессов, приводящих к деполяризации мюона, интерпретация полученных данных страдает столь большой неопределенностью и неоднозначностью, что широкого развития это направление не получило.

В данной работе предпринята попытка разработки метода проведения такого рода исследований в газовой фазе на примере реакции мюонного фтора с водородом. Идея метода состоит в следующем. В момент образования диамагнитной молекулы разрывается сверхтонкая связь магнитного момента мюона с парамагнитной электронной оболочкой мюонного атома или иона. Если к этому моменту мюон полностью не деполяризован, то во внешнем поперечном спину мюона магнитном поле B в μSR -спектре должен присутствовать сигнал прецессии на частоте $\omega_\mu = \gamma_\mu B$ свободного мюона ($\gamma_\mu = 8,52 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1} \cdot \text{Гс}^{-1}$). Поэтому возникает практическая возможность, варьируя концентрации компонентов, общее давление газовой смеси и величину внешнего магнитного поля, во-первых, определить скорость образования молекулы и, во-вторых, по динамике изменения поляризации идентифицировать каналы, приводящие к деполяризации.

В качестве объекта исследования была выбрана молекула HF , которая образуется в смеси $\text{Ne} + \text{H}_2$ при остановке в ней отрицательного мюона. В результате кулоновского захвата мюона атомом Ne образуется мюонный атом (на

первом этапе это многозарядный ион) с эффективным зарядом ядра $Z_{eff} = 9$ и электронной оболочкой фтора [2]. Выбор компонентов смеси был обусловлен, во-первых, химической пассивностью неона, во-вторых, большой величиной константы реакции $F + H_2 \rightarrow HF + H$ ($K > 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$ [4,5]), позволяющей при сравнительно небольших давлениях и концентрациях обеспечить образование молекулы HF за время, сравнимое с характерным временем сверхтонкого взаимодействия мюона с электронной оболочкой фтора (10^{-10} с) [6], и, в-третьих, тем, что вероятность захвата мюона атомом Ne в 5 раз выше, чем молекулой H_2 . Кроме того, в случае наблюдения молекулы HF появляется возможность определить величину остаточной поляризации отрицательного мюона P_K на K -оболочке Ne. Это важно, так как измерения P_K при наблюдении свободного мюонного атома фтора дают неустойчивый результат [2,7].

Измерения были выполнены на мю-тракте фазотрона ЛЯП ОИЯИ на μSR -установке [8], использовавшейся нами при измерении остаточной поляризации μ^- -мюонов в газообразном дейтерии [9]. Газовая мишень, рассчитанная на давление до 50 атм, представляет собой цилиндр из немагнитной нержавеющей стали объемом $\approx 9 \text{ л}$. Ось цилиндра совпадает с направлением пучка. Внутри мишени со стороны пучка установлены последовательно два кремниевых полупроводниковых детектора (ППД). Выделение остановок мюонов в объеме газа осуществлялось выбором порогов на энерговыделение в ППД при прохождении через них мюонов. Амплитуды сигналов с ППД записывались на магнитную ленту, что позволяло при последующей обработке с хорошей точностью отбирать мюоны, остановившиеся как в газе, так и в самих детекторах. В результате из рабочих спектров был практически полностью исключен фон $\mu \rightarrow e$ -распадов от остановок мюонов в детекторах, а фон от остановок в корпусе мишени был подавлен до уровня $< 10\%$. Поперечное пучку магнитное поле напряженностью 200 Гс на мишени с неоднородностью по объему мишени $< 1\%$ создавалось с помощью колец Гельмгольца. Электроны $\mu \rightarrow e$ -распада регистрировались тремя телескопами, каждый из которых состоял из двух сцинтилляционных счетчиков, включенных в совпадение. Два телескопа были установлены по бокам от мишени параллельно пучку, третий – позади нее и поперек пучка. В работе использовались газы Ne и H_2 особой чистоты промышленной очистки. Для повышения чистоты Ne в процессе заполнения мишени газ пропускаться через циркониевый геттер (650°C).

Поскольку на данном этапе основной задачей являлось выяснение возможности наблюдения факта образования молекулы HF, были проведены две экспозиции мишени на пучке μ^- -мюонов: в чистом Ne и в смеси $\text{Ne}(24 \text{ атм}) + \text{H}_2(16 \text{ атм})$. Полученные с трех телескопов временные спектры обрабатывались совместно МНК методом (программа FUMILI) фитированием функцией вида

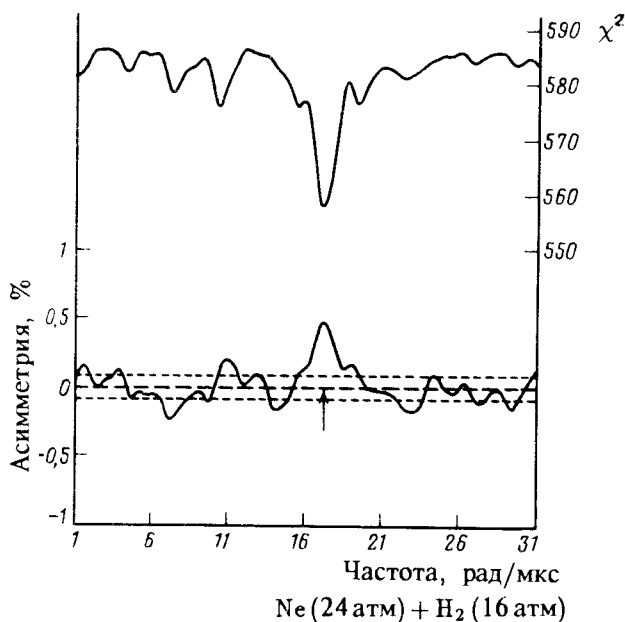
$$F_i(t) = A_{Nei} \exp(-\lambda_{Ne}t)[1 + a \cos(\omega t + \varphi_i)] + A_{Fеi} \exp(-\lambda_{Fe}t) + B_i. \quad (1)$$

Здесь i – номер телескопа; A_{Nei} – число электронов $\mu \rightarrow e$ -распада при $t=0$ в Ne в i -ом телескопе, λ_{Ne} – скорость гибели мюона в Ne; $A_{Fеi}$, λ_{Fe} – то же для Fe; B_i – фон, φ_i – начальная фаза. Минимизация функционала проводилась при условии, что параметры λ_{Ne} , λ_{Fe} , a и ω общие для всех телескопов, а фазы φ_i боковых телескопов равны $\varphi_0 \pm 90^\circ$, где φ_0 – фаза для телескопа, установленного в пучке мюонов.

Мишень	$a(\%)$	$\omega(\text{рад/мкс})$	$\tau_\mu(\text{мкс})$	χ^2/N	Статистика
24Ne	0,08(10)	17,3	1,463(10)	633/606	2,56 млн. Ne +11, 5% Fe 96 тыс.
Si	2,93(68)	16,8(41)	0,792(30)	549/530	
24Ne+16H ₂	0,59(9)	17,16(10)	1,466(9)	558/523	3,5 млн. Ne +7, 7% Fe 96 тыс.
Si	3,68(69)	17,24(33)	0,769(20)	525/522	
24Ne+1,8H ₂	0,325(130)	17,36(38)	1,467(13)	529/531	1,55 млн. Ne +9, 9% Fe 115 тыс.
Si*	3,29(63)	17,85(35)	0,755(30)	541/531	
24Ne+8H ₂	0,33(14)	16,97(38)	1,463(13)	523/531	1,62 млн. Ne +8, 5% Fe 960 тыс.
C	4,32(15)	17,01(2)	2,015(5)	574/594	

*Суммарно по сеансу по смесям +H₂(1,8атм) и +H₂(8атм).

Результаты обработки представлены в таблице. Асимметрия a для чистого неона определена по области частот $17,0 \pm 0,5$ рад/мкс. Параметры прецессии в кремнии являются результатом анализа спектров, полученных по описанной выше методике выделения остановок, и служат контролем параметров установки, в том числе и величины магнитного поля внутри мишени. В таблицу также включены данные с углеродной мишенью, необходимые для определения поляризации мюонов пучка.

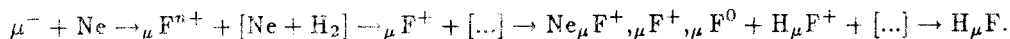


Зависимости χ^2 (верхняя кривая) и амплитуды прецессии (нижняя кривая) от частоты прецессии ω для смеси 24 атм Ne + 16 атм H₂. Пунктиром обозначен коридор ошибок $\pm\sigma_a$.

На рисунке приведены зависимости амплитуды прецессии a и χ^2 от частоты ω , полученные при обработке временного μ SR-спектра для смеси Ne (24 атм) + H₂(16 атм).

Из приведенных результатов следует, что в смеси неона и водорода наблюдается сигнал на частоте свободного мюона и это может служить доказательством образования диамагнитной молекулы HF. Имея этот результат, мы предприняли попытку исследовать кинетику ее образования. Для этого были проведены две экспозиции мишени со смесями Ne (24 атм) + H₂ (1,8 атм) и Ne (24 атм) + H₂ (8 атм). Результаты обработки также включены в таблицу.

Процессы, протекающие в смеси Ne+H₂, можно схематически представить в виде цепочки:



Здесь μF — мюонный атом (ион) фтора. В магнитном поле при наблюдении частоты ω_μ парамагнетизм промежуточных состояний и hf -взаимодействия приводят к следующей зависимости коэффициента асимметрии a от скорости химической реакции λ_{H} и частоты прецессии парамагнитного состояния ω_p [3]:

$$a = A \frac{\lambda_{\text{H}}}{(\lambda_{\text{H}}^2 + \omega_p^2)^{1/2}}. \quad (2)$$

Здесь $A = a_0 P_K D$, $a_0 \approx 0,33$, P_K — остаточная поляризация мюона на K -оболочке. Величина D определяется деполяризацией за счет hf -взаимодействий в ионе μF^+ ($D^+ = 0,447$), атоме μF^0 ($D^0 = 0,417$) [10] и, возможно, в молекулярных ионах. В случае, когда время химического взаимодействия меньше или сравнимо с временами протекания перечисленных процессов, D зависит также и от λ_{H} . Кроме того, в нес могут вносить вклад процессы перезарядки при формировании электронной оболочки иона μF^{n+} , однако, по имеющимся оценкам [11], при давлении смеси порядка 20 атм вклад этих процессов невелик.

К сожалению, точности измеренных параметров асимметрии при давлениях H₂ (1,8 атм) и H₂ (8 атм) не позволяют детально проанализировать динамику образования молекулы HF. Фитирование экспериментальных данных зависимостью (2) с заменой $\lambda_{\text{H}} \rightarrow \lambda_1 X$, где X — давление H₂ в атмосферах, λ_1 — скорость химической реакции при $X = 1$ атм H₂, дало следующие оценки для параметров A и ω_p/λ_1 : $A = 0,54 \pm 0,09\%$, $\omega_p/\lambda_1 = 2,8 \pm 2,0$. Полагая $\omega_p \simeq 100\omega_\mu$ равной мюониевой, для константы химической реакции имеем: $K \simeq (2,3 \pm 1,6) \cdot 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$, что согласуется с известным значением $K = (2,5 \pm 0,8) \cdot 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$ [4].

Полагая, что остаточные поляризации P_K на K -оболочках Ne и C одинаковые и $a_C = a_0 P_K$, можно оценить фактор деполяризации $D = A/a_C = 0,13 \pm 0,02$. Это меньше ожидаемого, даже если предположить, что в процессе каскада реакций $\mu\text{F}^+ + \text{Ne} + \text{H}_2 \rightarrow \dots \rightarrow \text{H}\mu\text{F}$ в промежуточном состоянии обязательно образуется нейтральный атом μF^0 , причем времена жизни как μF^+ , так и μF^0 больше соответствующих времен сверхтонкого взаимодействия. К сожалению, на данном уровне статистики более детальное обсуждение не кажется продуктивным. Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что параметры A и λ_1 очень чувствительны к величине и точности измерения коэффициентов асимметрии при низкой концентрации водорода, например, при H₂ (1,8 атм). Эти проблемы могут быть сняты набором необходимой статистики. Принципиальный же вывод из представленных результатов исследований состоит в том, что экспериментально была показана возможность

использования μ^- -SR-метода для исследований быстропротекающих процессов взаимодействий мюонных атомов со средой, которые до сих пор проводились лишь с положительно заряженными мюонами.

Авторы благодарны В.П.Джелегову и В.Г.Зинову за поддержку и интерес к работе, В.С.Роганову и А.Н.Руденко за помощь в проведении измерений.

-
1. В.П.Смилга, Ю.М.Белоусов, Мюонный метод исследования вещества, М.: Наука, 1991.
 2. Yu.P.Dobretsov, V.A.Dolgoshein, and V.G.Kirillov-Ugryumov, *Hyperfine Inter.* **18**, 845 (1984).
 3. В.С.Евсеев, Т.Н.Мамедов, В.С.Роганов, Отрицательные мюоны в веществе, М.: Энергоатомиздат, 1985.
 4. А.С.Башкин, В.И.Игошин, Химические лазеры, М.: Наука, 1982.
 5. Л.И.Вирин, Р.В.Джагацянцян, Ионно-молекулярные реакции в газах, М.: Наука, 1972.
 6. В.Н.Горелкин, В.П.Смилга, *ЖЭТФ* **66**, 1201 (1974).
 7. В.Г.Варламов, Ю.П.Добрецов, Б.А.Долгошеин, В.Г.Кириллов-Угрюмов, *Письма в ЖЭТФ* **17**, 186 (1973).
 8. Г.Ф.Бинько, В.Н.Гребенев, Ю.Б.Гуров и др., *ПТЭ* **4**, 58 (1990).
 9. Г.Ф.Бинько, В.Н.Гребенев, Ю.Б.Гуров и др., *Письма в ЖЭТФ* **49**, 476 (1989). TRIUMF Report TRI-89-2, p.A28.
 10. Ю.П.Добрецов, Б.А.Долгошеин, В.Г.Кириллов-Угрюмов и др., *Сб. Мезоядерная физика*, М.: Энергоатомиздат, 1983, с.74.
 11. Л.И.Меньшиков, *ЖЭТФ* **83**, 933 (1982).