

МЮОНИЙ В ИЗОТОПАХ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ

*Р.Абела*¹⁾, *Д.Герлах*¹⁾, *Э.Морензони*¹⁾, *Д.Солт*¹⁾, *У.Циммерманн*¹⁾,
Ф.Н.Гигахс^{*1)}, *А.Шенк*^{*1)}, *Д.Г.Ещенко*⁺, *Е.П.Красноперов*[□],
Е.Е.Мейлихов[□]

Институт Пауля Шеррера, Виллиген, Швейцария

**Институт физики промежуточных энергий, Цюрих, Швейцария*

*+Институт ядерных исследований РАН,
 117334, Москва, Россия*

*□ Российский научный центр "Курчатовский институт"
 123182, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 29 декабря 1992 г.

В слабом поперечном магнитном поле (0,4Гс) измерена асимметрия прецессии спина мюония в изотопах жидкого гелия и в растворе с малой примесью ³He (0,2%), Диапазон температур 0,5–2,5К. Обнаружено, что в сверхтекучем чистом ⁴He и в растворе при температуре ниже 0,7К мюон практически не существует в свободном состоянии, а образует с электроном атом – Mu.

Физика образования атома мюония имеет давнюю историю, но далека от адекватного описания, особенно когда дело касается конденсированных сред. Существуют в основном две модели формирования мюония: модель горячего атома ¹ и трековая модель ^{2,3}. Однако, на их основе трудно сделать априорные оценки доли образующихся атомов мюония – Mu. Это относится даже к средам со слабым взаимодействием, таким как жидкий гелий, водород и неон, не говоря уже о сложных структурах. Считалось ⁴, что в жидком гелии вероятность образования мюония мала, так как его энергия связи меньше потенциала ионизации атома гелия, соответственно 13,5 и 25эВ. Обнаружение свободной прецессии спина мюония в сверхтекучем ⁴He при температуре $T = 0,52\text{ К}$ ⁵ опровергло эту точку зрения. Обычно в экспериментах наблюдают Mu с малым временем образования. Видимые изменения формирования мюония (в асимметрии) происходят главным образом при фазовых переходах, например, при затвердевании. Другие же условия, влияющие на физику процесса, до сих пор мало исследованы. Согласно трековой модели ³ скорость образования мюония пропорциональна подвижности зарядов. С этой точки зрения сверхтекучий гелий представляет уникальную возможность для изучения образования мюония, поскольку в нем с понижением температуры от 2,17 до 0,5К подвижность зарядов возрастает на 5 порядков.

В данной работе изучена кинетика образования мюония в изотопах жидкого гелия и их растворе в интервале температур 0,5–2,5К. Эксперименты выполнялись на канале поверхностных мюонов Института Пауля Шеррера (PSI, Швейцария) с использованием ранее описанного ⁵ оборудования. Отличие состояло лишь в том, что окно камеры образца было заклеено позолоченным (1000 Å) каптоном, причем металлизированная поверхность каптона обращена к жидкому гелию и имела электрический контакт с медным корпусом камеры.

¹⁾R.Abela, D.Herlach, E.Morenzoni, G.Solt, U.Zimmermann – Paul Sherrer Institute, CH-5232 Villigen, Switzerland
 F.N.Gyghax, A.Schenck – Institute for Intermediate Energy Physics, Zurich, Switzerland

В новой камере не происходит захвата зарядов на диэлектрическом каптоне окна, тем самым устранено остаточное электрическое поле, влиявшее на образование мюония.

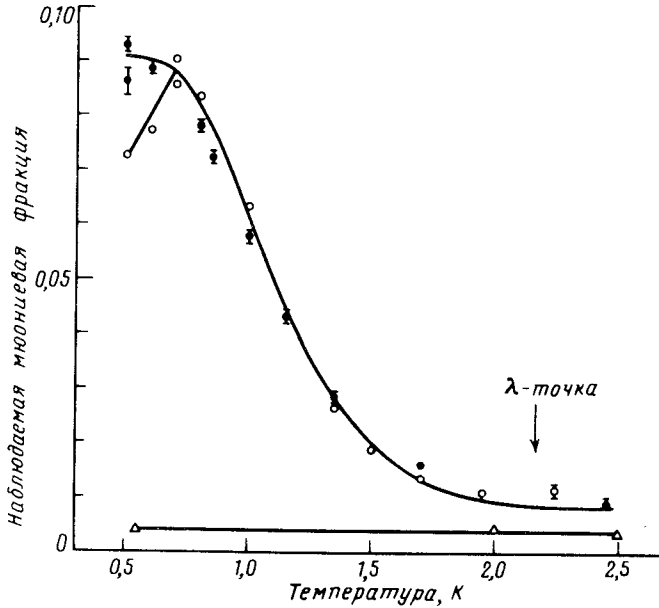


Рис.1. Температурная зависимость наблюдаемой асимметрии прецессии мюония в изотопах жидкого гелия: о – чистый ^4He , • – $^4\text{He} + 0,2\% \text{ } ^3\text{He}$, Δ – чистый ^3He . Не указанные статистические ошибки меньше размера символа

На рис.1 изображена температурная зависимость асимметрии мюония в чистом ^4He и ^3He , а также в растворе $^4\text{He} + 0,2\% \text{ } ^3\text{He}$. Измерения выполнены в слабом поперечном поле $H = 0,4$ Гс. Фактически данное поле позволяет регистрировать атомы Mu , которые образовались за времена меньше $\tau \leq 10^{-7}$ с. С увеличением τ (или поля) из-за спиновой расфазировки амплитуда прецессирующего сигнала падает, так что медленно образующиеся атомы Mu в прецессии не наблюдаются⁵. При высоких температурах как в чистых жидкостях, так и в растворе A_{Mu} мало. В области же низких температур функциональные зависимости $A_{\text{Mu}}(T)$ существенно различаются. Подвижность зарядов в ^3He слабо зависит от температуры⁶, и, как и следовало ожидать, асимметрия мюония в нем не зависит от температуры в пределах точности измерений. Возникновение сверхтекучести радикально влияет на образование мюония. В чистом ^4He и в слабом растворе A_{Mu} увеличивается с понижением температуры. При $T \approx 0,7$ К в ^4He наблюдается максимум, после чего асимметрия уменьшается на 15%. В предыдущем эксперименте⁵ из-за влияния остаточного электрического поля захваченных зарядов значение A_{Mu} при $T = 0,5$ К несколько меньше. В растворе в промежуточных температурах асимметрия Mu ниже, чем в ^4He , а максимум (если существует) смещен в область более низких температур.

Начальная мюонная асимметрия для данной геометрии мишени и сцинтилляторов составляла 0,21. Поскольку при образовании мюония половина

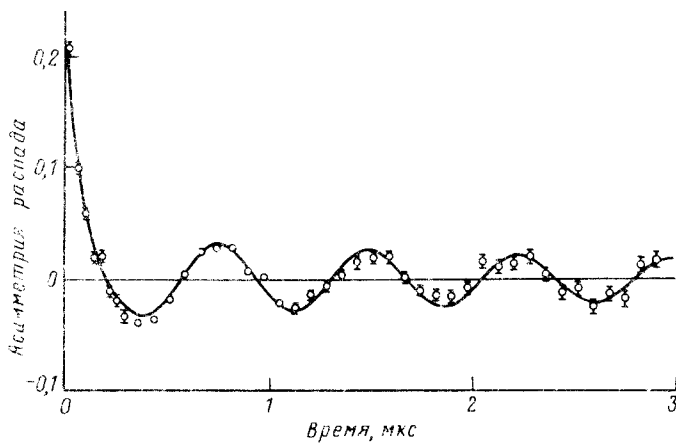


Рис.2. Прецессия мюонного спина в растворе ${}^4\text{He} + 0,2\% {}^3\text{He}$. Поле $H = 100 \text{ Гс}$, $T = 0,5 \text{ К}$, $A_\mu = -3,6 \pm 0,2$, $\lambda_\mu = 0,21 \pm 0,04 \text{ мкс}^{-1}$. Начальный участок гистограммы соответствует формированию мюония с характерным временем 60 нс

асимметрии исчезает ⁴, то легко видеть, что при низкой температуре ($0,7 \text{ К}$ для ${}^4\text{He}$ и $0,5 \text{ К}$ для раствора) асимметрия мюония близка к максимально возможной ($0,105$). Эксперимент в сильном поле показал, что, действительно, мюонная компонента мала. На рис.2 изображена гистограмма мюонной прецессии в поле 100 Гс , из которой видно, что амплитуда сигнала не превышает $A_\mu \approx 0,036 \pm 0,002$. Слабое затухание прецессии ($\lambda \approx 0,2 \text{ мкс}^{-1}$) связано с медленно образующейся мюонисвой фракцией. Большая часть атомов мюония (90%) при низкой температуре формируется за времена меньше, чем 10^{-7} с , а для наблюдения медленно образующейся части необходимо магнитное поле существенно более слабое, чем $0,4 \text{ Гс}$.

Количественное описание наблюдаемых зависимостей затруднено по ряду причин. Нет данных о взаимном радиальном и угловом распределении электрон-мюонных пар на конце трека. Это распределение, как показали последние эксперименты, анизотропно. Наименее изученным в формировании мюония является кинетика заряженных частиц в сильных электрических полях и на малых временных интервалах. Подавление мюонной релаксации электрическим полем вблизи T_λ ⁷ и сближение асимметрии мюония в поле при $T = 0,52 \text{ К}$ ⁵ свидетельствуют о том, что в жидком гелии электроны и мюоны после последней ионизации разлетаются в узком интервале расстояний от $r_0 = (2 - 3) \cdot 10^{-5} \text{ см}$ до $r_1 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ см}$. Этот разлет соответствует полям $E = 10 - 1000 \text{ В/см}$, где кинетика зарядов относительно хорошо изучена ⁸. Используя это обстоятельство, можно в рамках вязкого движения качественно понять физику образования мюония в изотопах жидкого гелия.

Формирование мюония в гелии протекает в три этапа. 1) Возбужденный атом Mu^* , образующийся в результате последней перезарядки ¹, сталкивается с гелием и распадается на электрон и мюон. Разлетающиеся частицы имеют энергию недостаточную для ионизации гелия (мюон во всяком случае). Путем упругих столкновений e^- и μ^+ снижают свою энергию и на низкоэнергичном уровне электроны образуют "пузырьки" ⁹, а мюоны – по-

ляризациянные "ледышки" с большой эффективной массой ¹⁰. 2) Затем под действием кулоновского притяжения частицы сближаются друг с другом. 3) Процесс образования мюония завершается рекомбинацией пузыря и ледышки.

Подвижность зарядов в нормальном ⁴He, в растворе и в ³He относительно низкая, и наиболее длительным является сближение частиц. Время вязкого сближения зарядов в кулоновском поле равно $t = r^3/3be$. При $T = 2,5$ K взаимная подвижность зарядов $b = b_+ + b_- \simeq 0,08 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ⁸, и только ближайшие электрон-мюонные пары (с $r < r_0$) сближаются за время $t \simeq 10^{-7}$ с. В этом случае незначительное число атомов мюония образуется за время формирования прецессирующей части спектра - τ , т.ч. амплитуда мюониевой прецессии мала. С понижением температуры (и экспоненциальным ростом подвижности) A_{Mu} увеличивается. Когда подвижность возрастает на три порядка, то за время τ успеют сближаться все наиболее разнесенные пары с расстояний r_1 , и амплитуда прецессии мюония достигает наибольшего значения. Это происходит при $T_m = 0,5$ K для раствора и при $T_m = 0,85$ K для чистого ⁴He.

Подвижность зарядов в растворе ограничена примесным рассеянием, и ниже 0,6 K она практически неизменна ⁸. В чистом ⁴He подвижность зарядов растет вплоть до 0,5 K. Максимум на зависимости $A_{\text{Mu}}(T)$ в чистом гелии, по-видимому, связан с замедлением формирования Mu в условиях аномально высокой подвижности зарядов. Если образование поляризационной шубы вокруг мюона (с массой $M \simeq 40 - 50$ атомов He) происходит на скоростях выше критической скорости Ландау - v_L , то при низких температурах эффективные времена рассеяния зарядов на газе возбуждений (и времена релаксации скорости $\tau_{\text{уст}} \simeq b \cdot M/e$) становятся большими. Так, при 0,6 K $b > 10^3 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, и время релаксации скорости $\tau_{\text{уст}} > 2 \cdot 10^{-7}$ с. Это означает, что если мюонная ледышка имеет скорость порядка v_L и ее кинетическая энергия $Mv_L^2/2$ больше потенциальной e^2/r (последнее условие выполняется для $r > 5 \cdot 10^{-5}$ см), то релаксация скорости произойдет на расстояниях $r \simeq v_L \cdot \tau_{\text{уст}} \simeq 10^{-3}$ см $> r_1$. Этот процесс эквивалентен размытию эффективного распределения мюонов и увеличивает среднее время сближения, что, в свою очередь, уменьшает амплитуду мюониевой прецессии. Заметим, что рождение сверхтекучих колец (если оно происходит), также могло бы объяснить различие в поведении $A_{\text{Mu}}(T)$ в чистом ⁴He и в растворе при низких температурах. Следует также иметь в виду, что время собственно рекомбинации, связанное с проплавлением мюонной ледышки и электронного пузыря, может быть заметным при очень низких температурах, но оценить это время достаточно трудно.

Таким образом, в сверхтекучем жидком гелии и в его слабых растворах с понижением температуры возрастает количество образующихся атомов мюония, и при температуре ниже 0,7 K благодаря быстрой кинетике практически все мюоны связываются с электронами. Полученный результат убедительно показывает, что обнаруженная ранее ¹¹ мюонная релаксация в гелии обусловлена образованием мюония. Не исключено, что и в других криообъектах, например, в водороде ¹², подобные эффекты могут влиять на мюонную релаксацию. Это следует учитывать при анализе диффузионных процессов на основе мюонной релаксации. Если доли мюонной и мюониевой фракций сопоставимы, то не только магнитные ядерные диполь-дипольные взаимодействия, но также быстрые ² и медленные процессы образования мюония, влияют на деполаризацию.

1. D.G.Fleming, R.J.Mikula, and D.M.Garner, *Phys. Rev. A* **26**, 2527 (1982).
2. P.W.Percival, E.Roduner, and H.Fischer, *Chem. Phys.* **32**, 353 (1978).
3. F.M.Jacobsen, *Нур. Int.* **32**, 501 (1986).
4. В.П.Смилга, Ю.М.Белоусов, М.: Наука, 1991.
5. E.Krasnoperov, E.E.Meilikhov, R.Abela, et al., *Phys. Rev. Lett.* **69**, 1560 (1992).
6. P.V.E.McClintock, *J. Low Temp. Phys.* **11**, 277 (1973).
7. Д.Г.Ещенко, Е.П.Красноперов, С.Г.Барсов и др., *Письма в ЖЭТФ* **48**, 568 (1988)
8. В.Б.Шикин, *УФН* **121**, 457 (1977).
9. K.R.Atkins, *Phys. Rev.* **116** 1339 (1959).
10. R.A.Ferrel, *Phys. Rev.* **108**, 167 (1957).
11. Е.П.Красноперов, В.Г.Сторчак, С.Г.Барсов и др., *Письма в ЖЭТФ* **42**, 263 (1985).
12. Дж.Х.Брюер, Е.П.Красноперов, Е.Е.Мейлихов и др., *Письма в ЖЭТФ* **53**, 577 (1991).