

## СПИНОВАЯ ДЕПОЛЯРИЗАЦИЯ МЮОНОВ В КОНДЕНСИРОВАННОМ АЗОТЕ

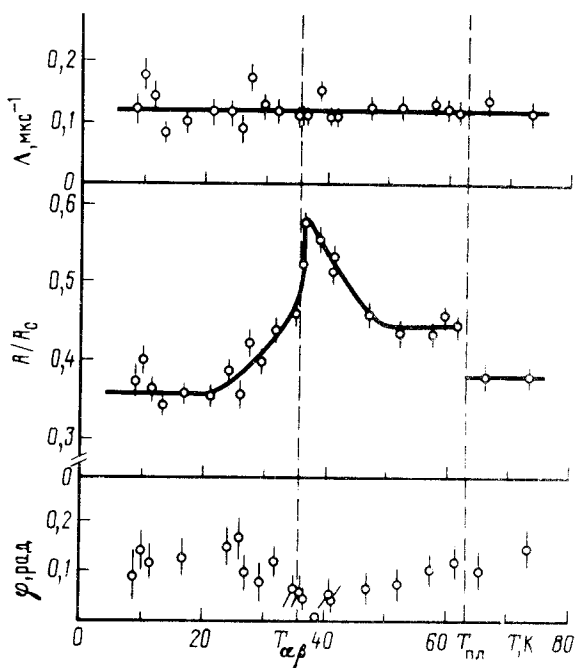
*В.Г.Гребинник, В.Н.Дугинов, Б.Ф.Кириллов, А.Б.Лазарев,  
Б.А.Никольский, А.В.Пирогов, В.Г.Сторчак, С.Н.Шилов*

Измерены температурные зависимости скорости деполяризации, начальной амплитуды и начальной фазы мюонной прецессии в жидком и кристаллическом азоте. Обнаружена быстрая деполяризация мюонов. Вблизи  $\alpha$ - $\beta$ -перехода в твердом азоте наблюдается аномальное поведение начальных амплитуды и фазы мюонной прецессии.

В работе <sup>1</sup> была обнаружена деполяризация мюонов в параводороде, что позволило сделать вывод об образовании иона  $H_2\mu^+$ . По-видимому, положительные мюоны образуют аналогичные ионы во всех криокристаллах. Об этом свидетельствует большая энергия связи протона с молекулами криокристаллов <sup>2</sup>. В газообразном азоте 84% мюонов образуют атом мю-

ония ( $\text{Mu}$ ), а 16% находятся в диамагнитной фракции <sup>3</sup>. Наиболее вероятным диамагнитным соединением мюона в азоте является ион  $\text{N}_2\mu^+$ . Аналогичный ион  $\text{N}_2p^+$  имеет линейную структуру с расстояниями  $r_{\text{NN}} = 1,1 \text{ \AA}$ ,  $r_{\text{Np}} = 1,0 \text{ \AA}$  и энергией связи  $5,1 \text{ эВ}$  <sup>4</sup>. Измеренные в работе <sup>5</sup> значения скорости деполаризации мюонов в конденсированном азоте могут быть объяснены в рамках диполь-дипольного механизма релаксации в ионе  $\text{N}_2\mu^+$  без привлечения механизма взаимодействия мюонов с частицами образованных ими треков. К сожалению, в работе <sup>5</sup> не приведены значения поляризации мюонов в азоте, которые позволили бы сделать заключение о характере образованного мюоном соединения. Настоящая работа посвящена исследованию конденсированного азота  $\mu\text{SR}$ -методом с целью выяснения механизма релаксации мюонов в  $\text{N}_2$ .

Эксперимент выполнен на фазотроне ОИЯИ с использованием стандартной  $\mu\text{SR}$ -методики. Измерены параметры прецессии спинов мюонов в конденсированном азоте в поперечном магнитном поле в диапазоне температур  $8 \div 75 \text{ К}$ . Конденсация азота осуществляется в камеру образца, имеющую форму цилиндра радиусом 40 мм и высотой 24 мм путем обдува холодным гелием. Ось цилиндра совпадает с осью мюонного пучка. Окна камеры образца радиусом 40 мм выполнены из майлара толщиной 40 мкм. Гелиевая камера, внутри которой помещается камера образца, имеет окна из латунной фольги толщиной 100 мкм. Отношение эффективной толщины всех окон криостата к эффективной толщине образца кристаллического азота при  $T = 20 \text{ К}$  составляет 0,07. Регулировка температуры и ее стабилизация с точностью 0,1 К осуществляется обдувом газообразным гелием. Температура азота измеряется полупроводниковым термометром, помещенным непосредственно в камеру образца.



Температурные зависимости скорости деполаризации мюонов  $\Lambda$ , начальной амплитуды  $A/A_0$  и начальной фазы  $\varphi_{\text{Mu}}$  мюонной прецессии в конденсированном азоте в поперечном магнитном поле  $H = 100 \text{ Э}$

Экспериментальные спектры обрабатывались в соответствии с выражением  $N(t) \sim A e^{-\Lambda t} \times \cos(\omega t + \varphi)$ , где  $\Lambda$  — скорость деполаризации мюонов,  $A$  и  $\varphi$  — начальные амплитуда и фаза мюонной прецессии,  $\omega$  — частота мюонной прецессии. Ширина канала составляла 5,5 нс. Фурье-анализ спектров прецессии мюонов выявил лишь одну линию на мюонной частоте. Побочные линии отсутствовали с точностью 1% от амплитуды спектра на мюонной частоте. Этот факт однозначно свидетельствует о том, что мюон в конденсированном азоте при больших временах ( $t \gtrsim 10^{-7} \text{ с}$ ) находится в диамагнитном соединении либо в свободном состоянии. В верхней части рисунка показана температурная зависимость скорости деполаризации мюо-

нов в конденсированном азоте. Во всем диапазоне температур  $\Lambda$  не зависит от температуры и равна  $0,12 \pm 0,02 \text{ мкс}^{-1}$ . Значение  $\Lambda$ , вычисленное в рамках механизма диполь-дипольного взаимодействия локализованного в междоузлии решетки либо в вакансии свободного мюона с окружающими молекулами азота, оказывается значительно меньше экспериментальной величины. Оценка скорости деполяризации мюонов в покоящемся ионе  $N_2\mu^+$  с параметрами иона  $N_2p^+{}^3$  дает величину  $\Lambda \approx 0,1 \text{ мкс}^{-1}$ , которая хорошо согласуется с экспериментальным значением.

На средней части рисунка изображена температурная зависимость начальной амплитуды мюонной прецессии в азоте, нормированная на значение полной мюонной амплитуды, измеренной в эксперименте с медью и составляющей  $A_0 = 0,160 \pm 0,002$ . Во всем температурном интервале амплитуда  $A/A_0$  оказывается значительно меньше единицы. Это означает, что в конденсированном азоте имеет место быстрая деполяризация мюонов за времена, не наблюдаемые в эксперименте. Быстрая ( $t < 10^{-8}$  с) деполяризация мюонов в азоте вряд ли может быть обусловлена взаимодействием с примесными молекулами кислорода. Содержание кислорода было измерено в исходном газе и составило  $0,7 \cdot 10^{-4}$ . Предположим, что кислород равномерно растворен в азоте. Тогда время сближения термализованного мюона с такой молекулой кислорода оказывается порядка  $10^{-6} \div 10^{-5}$  с, что значительно больше  $t$ .

По-видимому, причиной быстрой деполяризации мюонов в конденсированном азоте является образование атома мюония. В рамках мюониевого механизма быстрой деполяризации мюонов в азоте естественно предположить, что на малых временах в азоте протекает реакция:



Локализованный в азоте атом мюония через время  $\tau$  вступает в реакцию с молекулой азота с образованием диамагнитного комплекса  $N_2\mu^+$ . Последующая медленная деполяризация мюона протекает в ионе  $N_2\mu^+$  с характерной скоростью  $\Lambda$ , измеряемой в эксперименте. Если атом мюония в азоте находится в основном состоянии  $1S$ , то реакция (1) крайне маловероятна ввиду ее сильнейшей эндотермичности ( $Q < 0$ ), поскольку энергия связи мюония в основном состоянии (13,55 эВ) значительно превышает энергию связи мюона в ионе  $N_2\mu^+$  ( $\sim 5$  эВ). Известно, однако, что время жизни  $2P$ -состояния атома водорода составляет  $1,6 \cdot 10^{-9}$  с, а состояние  $2S$  вообще является метастабильным со временем жизни  $0,14 \text{ с}$ . Если время  $\tau$  оказывается меньше времени жизни возбужденного состояния атома мюония, реакция (1) может протекать в конденсированном азоте. Оценка времени химической реакции  $\tau$  может быть получена в результате измерения начальной фазы мюонной прецессии  $\varphi$ . На нижней части рисунка изображена температурная зависимость  $\varphi_{\text{Mu}} = \varphi - \varphi_0$ , где  $\varphi_0$  — "аппаратурная фаза", связанная с наличием определенного угла между направлением мюонного пучка и осью позитронного телескопа. Измеренная в эксперименте с медью величина  $\varphi_0$  составила  $(0,060 \pm \pm 0,015)$  рад. "Набегаемая" за время  $\tau$  мюониевая фаза  $\varphi_{\text{Mu}} \sim \omega_{\text{Mu}}\tau$ , где  $\omega_{\text{Mu}}$  — ларморовская частота мюония. Вблизи  $\alpha$ - $\beta$ -перехода значение фазы  $\varphi_{\text{Mu}}$  не превышает 0,04 рад, что соответствует времени  $\tau \sim 0,5 \cdot 10^{-10}$  с. Вдали от  $\alpha$ - $\beta$ -перехода верхняя оценка  $\tau$  дает величину порядка  $2 \cdot 10^{-10}$  с. Таким образом даже верхние оценки  $\tau$  оказываются меньше времени жизни возбужденного состояния мюония.

Необходимо отметить альтернативный механизм деполяризации мюонов в азоте, который может быть связан с процессом  $(N_2\mu^+)^* \rightarrow N_2\mu^+$ , где  $(N_2\mu^+)^*$  — возбужденное состояние иона  $N_2\mu^+$  с неспаренным электронным спином.

Авторы выражают глубокую благодарность И.И.Гуревичу за интерес к работе и ее поддержку, С.Н.Бурмистрову, И.Г.Ивантеру, Н.В.Прокофьеву, В.Г.Фирсову за обсуждение результатов, В.А.Жукову, В.Г.Ольшевскому, В.Ю.Помякушину за помощь в эксперименте.

#### Литература

1. Барсов С.Г. и др. Письма в ЖЭТФ, 1985, 41, 275.

2. *Bohme D.K. et al.* J. Chem. Phys., 1980, 73, 4976.
3. *Walker D.C.* Muon and muonium chemistry. Camb. Univ. Press., 1983.
4. *Kraemer W.P. et al.* Chem. Phys., 1986, 105, 87.
5. *Барсов С.Г. и др.* Труды международного симпозиума по проблемам взаимодействия мюонов и пионов с веществом. Дубна, 1987, с. 149.
6. *Давыдов А.С.* Квантовая механика. М.: Наука, 1963.

Институт атомной энергии  
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию  
1 декабря 1989 г.

Объединенный институт  
ядерных исследований

---