

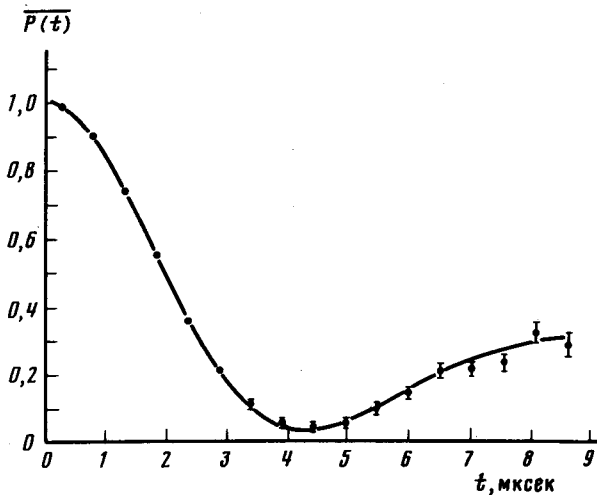
РЕЛАКСАЦИЯ СПИНА ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО МЮОНА В СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ СОСТОЯНИИ СПЛАВА Nb_3Al

*С.Г.Барсов, А.Л.Геталов, В.Г.Гребинник,
В.А.Гордеев, И.И.Гуревич, В.А.Жуков, Б.Ф.Кириллов,
А.И.Климов, С.П.Круглов, Л.А.Кузьмин, А.Б.Лазарев,
С.М.Микиртычянц, Б.П.Михайлов, Б.А.Никольский,
А.В.Пирогов, А.Н.Пономарев, В.И.Селиванов,
В.А.Суетин, М.Н.Хлопкин, Г.В.Щербаков*

Измерена скорость дипольной релаксации σ спина положительного мюона в сверхпроводящем состоянии сплава Nb_3Al при температуре 12 К. Полученная экспериментальная зависимость поляризации мюонов от времени хорошо описывается функцией Кубо – То-ябе статического распределения дипольных магнитных полей ядер кристаллической решетки Nb_3Al при отсутствии диффузии мюонов. Экспериментально определенному значению $\sigma = 0,402 \pm 0,002 \text{ мкс}^{-1}$ отвечает среднеквадратичное значение ядерного магнитного поля на мюоне, равное $\sim 8,2 \text{ Э}$.

Измерение магнитных дипольных взаимодействий спина положительного мюона в металле представляет собой эффективный метод изучения диффузии этой частицы¹⁻³, которая с точки зрения физики твердого тела может рассматриваться как легкий изотоп протона. Параметры диффузии определяются по временной зависимости поляризации мюонов $P(t)$, обусловленной дипольными взаимодействиями мюонов с магнитными моментами ядер кристаллической решетки металла.

При изучении медленной диффузии мюонов наиболее чувствительным является метод измерения зависимости $P(t)$ в нулевом внешнем магнитном поле, предложенный в работе³. В этом плане интересным объектом исследования являются металлы в сверхпроводящем состоянии – в сверхпроводящих областях изучаемых образцов внешнее поле в точности равно нулю. Кроме этого, работа со сверхпроводниками дает большой методический выигрыш, поскольку позволяет полностью исключить фон, связанный с остановкой части мюонов в стенках криостата.



Экспериментальная зависимость $\overline{P(t)}$ поляризации мюонов в Nb_3Al при температуре $T = 12$ К. Не показаны на рисунке статистические ошибки экспериментальных значений $P(t)$ при $t < 3$ мкс не превышают 1%. Плавная кривая представляет собой теоретическую зависимость $P_{\text{теор}}(t)$ при $\sigma = 0,402$ мкс $^{-1}$

Такой фон достигает 20% и существенно искажает временную зависимость $P(t)$ в исследуемом образце. Исключение фона криостата в этом случае основано на использовании относительно небольшого внешнего поперечного магнитного поля H , которое приводит к ларморовской прецессии "фоновых" мюонов, остановившихся в стенках криостата, но не проникает в исследуемый сверхпроводник. Для того, чтобы исключить эффект "вымораживания" внешнего магнитного поля в сверхпроводник, поле H включается после охлаждения металла до сверхпроводящего состояния, в данном случае — после охлаждения сплава Nb_3Al до измеряемой температуры $T = 12$ К. При этом релаксация спина мюона в сверхпроводнике происходит только под действием ядерных магнитных полей окружающих атомов, а наблюдаемая зависимость $P(t)$ представляет собой сумму

$$P(t) = P_{\text{Nb}_3\text{Al}}(t) + P_{\text{фон}}(t) \quad (1)$$

прецессионного (фоновое) и релаксационного (в Nb_3Al) сигналов, которые легко отделяются друг от друга. Термин "релаксационный μ -сигнал" подчеркивает, что наблюдаемая в данном случае релаксация спина мюона в Nb_3Al происходит в отсутствие внешнего магнитного поля.

Использованный в настоящей работе образец Nb_3Al был изготовлен методом дуговой плавки в атмосфере аргона и представлял собой диск диаметром 30 мм и толщиной 10 мм. Химический анализ сплава показал состав, близкий к стехиометрическому: 75,4 ат.% ниобия и 24,6 ат.% алюминия. Критическая температура сплава при нулевом внешнем магнитном поле, определенная методом измерения теплоемкости, оказалась равной $T_{\text{кр}} = 17,3$ К. Эксперимент выполнен на мюонном канале синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР.

Зависимость $P(t)$ для Nb_3Al измерялась методом регистрации позитронов $\mu^+ \rightarrow e^+$ распада, как это подробно описано ранее⁴. Для исключения фона прецессирующих мюонов экспериментальная зависимость $P(t)$ была усреднена по временным интервалам, кратным периоду ларморовской прецессии мюона с частотой $\omega = eH/m_\mu c$ во внешнем поперечном магнитном поле $H = 284$ Э. При этом прецессионный фоновый сигнал $P_{\text{фон}}(t)$ в выражении (1) исчезает. Усредненная экспериментальная зависимость $P(t)$ в этом случае равна $P_{\text{Nb}_3\text{Al}}(t)$.

Экспериментальная зависимость $P(t)$ сопоставлялась с формулой Кубо — Тоябе⁵.

$$P_{\text{теор}}(t) = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} (1 - \sigma^2 t^2) \exp\left(-\frac{\sigma^2 t^2}{2}\right), \quad (2)$$

описывающей временную зависимость поляризации локализованных мюонов в нулевом внешнем поле при отсутствии осциллирующих дипольных магнитных моментов ядер решетки.

При выводе зависимости (2) предполагается, что распределение внутренних ядерных магнитных полей в местах локализации мюонов подчиняется гауссовскому закону со среднеквадратичным отклонением $\sqrt{\langle \Delta H^2 \rangle}$:

$$\sigma^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{e}{mc} \right)^2 \langle \Delta H^2 \rangle. \quad (3)$$

Из выражения (2) следует, что при $t \rightarrow \infty$ поляризация мюонов $P_{\text{теор}} \rightarrow 1/3$, как это и должно быть при релаксации спинов локализованных частиц в изотропных магнитных полях, постоянных во времени. Измеренное в нашем эксперименте значение величины σ оказалось равным $\sigma = 0,402 \pm 0,002 \text{ мкс}^{-1}$. Величина параметра Пирсона $\chi^2 = 20$ при среднем значении $\langle \chi^2 \rangle = 15$. Найденное значение σ соответствует среднеквадратичной величине поля на мюоне $\sqrt{\langle \Delta H^2 \rangle} = 8,2 \text{ Э}$.

Теоретическая и экспериментальная зависимость поляризации мюонов от времени показаны на рисунке. Хорошее соответствие экспериментальных данных функции Кубо — Тойбе (2) означает, что характерное время, отвечающее быстрой изменению ядерных магнитных полей на мюоне за счет диффузии мюона по кристаллу, во всяком случае превышает среднее время жизни мюона τ_{μ} . Полученный результат позволяет также утверждать, что частота осцилляций ядерных спинов ниобия и алюминия в сплаве Nb_3Al при температуре 12 К существенно меньше τ_{μ}^{-1} .

Авторы благодарны О.И.Сумбаеву и А.А.Воробьеву за содействие и поддержку этой работы, М.Т.Березову, А.Ф.Бурцеву, А.Н.Зайкаеву, И.П.Коновцу и С.Н.Шилову за помощь в работе.

Литература

1. Гуревич И.И., Мелешко Е.А., Муратова И.А., Никольский Б.А., Рогонов В.С., Селиванов В.И., Соколов Б.В. 1972, 40 А, 143.
2. Гребенник В.Г., Гуревич И.И., Жуков В.А., Маньч А.П., Мелешко Е.А., Муратова И.А., Никольский Б.А., Селиванов В.И., Суетин В.А., ЖЭТФ, 1975, 68, 1548.
3. Hayano R.S., Uemura Y.J., Imazato J., Nishida N., Yamazaki T., Kubo R. Phys. Rev., 1979, 20B, 850.
4. Мелешко Е.А., Морозов А.Г., Климов А.И., Никольский Б.А., Селиванов В.И. Препринт ИАЭ-2320, 1973.
5. Kubo R., Toyabe. In Magnetic Resonance and Relaxation (ed. R. Blinc, North-Holland Pub. Co., Amsterdam) p. 810.

Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова

Институт ядерной физики им. Б.П.Константинова
Академии наук СССР

Объединенный
институт ядерных исследований

Поступила в редакцию
11 декабря 1984 г.