



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

Д 321

P14-90-225

А.В.Демьянов, В.С.Евсеев, С.Капуста,
Т.Н.Мамедов, В.С.Роганов, Ю.В.Обухов¹,
В.И.Кудинов¹, А.А.Евдокимов², О.П.Ткачева²

**ИЗМЕРЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ АТОМНОГО ЗАХВАТА
И ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ МЮОНОВ
В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ**

Направлено в Оргкомитет V Международной конференции
по μ SR, Великобритания, апрель 1990 г.

¹Институт теоретической и экспериментальной физики,
Москва
²Московский институт радиотехники, электроники
и автоматики

В веществе отрицательные мюоны замедляются и затем захватываются атомами среды, образуя мюонные атомы, где один электрон замещен мюоном. При достижении $1S$ -состояния мюон сохраняет не более $(15+20)\%$ первоначальной поляризации. Мюонный атом можно представить как атом, состоящий из псевдоядра ($Z + \mu^-$) и из $(Z-1)$ электронов, поскольку мюон в $1S$ -состоянии расположен примерно в 200 раз ближе к ядру, чем $1S$ -электроны, и экранирует заряд ядра на единицу. Следовательно, при захвате поляризованного мюона атомами среды образуется система, которую можно рассматривать как магнитный зонд. Следя за судьбой мюонного атома, можно изучить его магнитные взаимодействия со средой и свойства среды в месте его локализации.

Рассмотрим, какие атомы, входящие в состав высокотемпературных сверхпроводников, могут быть исследованы с помощью отрицательных мюонов μSR -методом.

Время жизни $1/1$ мюона в $1S$ -состоянии атома кислорода примерно на порядок больше, чем в $1S$ -состоянии других рассматриваемых атомов ($Cu, Sz, Y, Ba, Nd, Eu, Gd, Ho, Bi$). Следовательно, электроны от распада мюонов в $1S$ -состоянии кислорода легко можно отделить от электронов $\mu-e$ распада из других атомов. Относительная вероятность распада мюона в кислороде намного больше, чем в других атомах; кислород практически имеет один изотоп со спином ядра, равным нулю. Эти обстоятельства являются благоприятствующими для исследования атома кислорода, входящего в состав ВТСП. Известно, что остаточная поляризация мюонов в кислороде достигает $15\%^{1/2}$, тогда как, например, для меди, обладающей спином $I = 3/2$, она близка к нулю $^{1/2}$. Последнее обусловлено взаимодействием магнитных моментов мюона и ядра и быстрыми переходами между состояниями сверхтонкой структуры. По той же причине остаточная поляризация мюонов в $1S$ -состоянии более тяжелых атомов ($Y, Ba, Nd, Eu, Gd, Ho, Bi$) с отличным от нуля ядерным магнитным моментом будет близка к нулю. Из вышеизложенного следует, что с помощью отрицательных мюонов μSR -методом может быть исследовано поведение атома кислорода в ВТСП.

Из экспериментов с отрицательными мюонами может быть получена информация о сверхпроводниках, аналогичная той, что получается из μSR -экспериментов с положительными мюонами (глубина проникновения внешнего магнитного поля в сверхпроводник, возникновение магнитоупорядоченных состояний в сверхпроводящем состоянии и т.д.). Однако следует

учесть, что отрицательные и положительные мюоны в кристалле локализируются в разных положениях. Поэтому проведение независимых μSR -исследований с положительными и отрицательными мюонами представляется необходимым.

В предыдущих рассуждениях предполагалось, что в ВТСП из оставшихся мюонов значительная часть захватывается атомами кислорода. Для проверки этого предположения было проведено измерение относительной вероятности захвата мюонов кислородом в некоторых ВТСП. Измерения проводились на сепарированном пучке с импульсом 125 МэВ/с из мезонного канала фазотрона ЛЯЦ-ОИЯИ. Образцы ВТСП были изготовлены так же, как описано в работе^{3/}.

Относительная вероятность захвата мюонов кислородом ВТСП определялась путем сравнения выхода электронов распада из $1S$ -состояния кислорода в исследуемом образце и из образца, состоящего из H_2O . Для каждого ВТСП изготовлена мишень из H_2O толщиной, эквивалентной тормозной толщине ВТСП. Напряженность внешнего, поперечного спину мюона магнитного поля составляла 100 эрстед. Электроны распада регистрировались в течение 8 мкс после остановки мюонов в мишени. Время между событиями остановки мюона и вылета электрона распада преобразовывалось в код и записывалось в память. Ширина временного канала в этих измерениях составляла 40 нс.

Из данных по распределению электронов распада во времени методом наименьших квадратов определялся выход электронов распада из кислорода. При обработке начальный участок спектра в диапазоне до 500+800 нс не принимался во внимание; тем самым из обработки исключался вклад захвата мюона тяжелыми атомами, поскольку разделить несколько экспонент с близкими временами жизни сложно. Оставшаяся часть спектра аппроксимировалась следующей функцией:

$$N(\varphi) = N_0 \cdot [1 + a \cdot \cos(\omega t + \varphi)] \cdot \exp(-t/\tau) + C,$$

где τ - время жизни мюона в кислороде, a - коэффициент асимметрии электронов распада, ω - частота прецессии спина мюона в магнитном поле, φ - начальная фаза прецессии, C - фон случайных совпадений.

Результаты измерений, выполненных при комнатной температуре, приведены в таблице 1. Экспериментальные данные по вероятности захвата мюонов кислородом сравниваются с расчетными значениями W_{cal} . W_{cal} были получены по средним значениям относительной вероятности захвата мюонов разными элементами в бинарных соединениях (окислы, фториды, хлориды, иодиды, бромиды, сульфиды) из работы^{4/}. Приведенные ошибки в W_{cal} включают ошибки среднего значения вероятности захвата мюонов элементами^{4/} и ошибки, связанные с изменением количества атомов кислорода в ВТСП.

Таблица 1. Относительная вероятность захвата мюонов кислородом в ВТСП

№ пп	Образец	$W_{exp}, \%$	$W_{cal}, \%$
1	$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	$21,7 \pm 0,4$	$25,6 \pm 1,5$
2	$NdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	$27,1 \pm 0,4$	$22,6 \pm 1,5$
3	$EuBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	$19,7 \pm 0,6$	$23,8 \pm 1,3$
4	$GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	$19,6 \pm 1,0$	$22,6 \pm 1,3$
5	$HoBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	$28,8 \pm 0,6$	$22,0 \pm 1,3$
6	$Bi_2CaSr_2Cu_2O_{8-\delta}$	$33,1 \pm 1,0$	$27,6 \pm 1,5$

Из таблицы 1 видно, что во всех измеренных образцах ВТСП вероятность захвата мюонов кислородом составляет более 19 процентов. Для некоторых образцов W_{exp} и W_{cal} существенно отличаются. Однако вряд ли можно придавать большое значение этому факту, так как W_{cal} вычислены по среднему значению вероятности захвата мюонов элементами в других типах соединений. Данные по относительной вероятности захвата мюонов кислородом могут быть полезными при планировании других экспериментов с отрицательными мюонами в ВТСП. Полученные результаты показывают, что при наличии эталонных образцов можно определить количество атомов кислорода в исследуемом образце или же можно следить за изменением количества кислорода в образце во времени, например, при его долговременном хранении.

Таблица 2. Остаточная поляризация положительных и отрицательных мюонов в ВТСП при комнатной температуре. Λ - скорость релаксации спина положительных мюонов

Образец	μ^-	μ^+	Λ
	a/a_c	a/a_{B_2}	
1 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	$0,18 \pm 0,05$	$0,93 \pm 0,01$	-
2 $NdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	$0,17 \pm 0,05$	$0,93 \pm 0,01$	-
3 $EuBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	$0,15 \pm 0,05$	$1,03 \pm 0,01$	-
4 $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	$0,14 \pm 0,05$	$1,02 \pm 0,02$	$0,21 \pm 0,01$
5 $HoBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	$0,13 \pm 0,05$	$0,9 \pm 0,01$	-
6 $Bi_2CaSr_2Cu_2O_{8-\delta}$	$0,35 \pm 0,05$	$0,88 \pm 0,01$	-

В таблице 2 представлены результаты измерения остаточной поляризации отрицательных мюонов в $1S$ -состоянии кислорода в ВТСП при комнатной температуре. Измерение остаточной поляризации проводилось в тех же условиях, что и при измерении относительной вероятности захвата

мюонов кислородом. Для мишеней $NdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $HoBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ были проведены измерения и при ширине временного канала 5 нс. Для контроля была измерена остаточная поляризация положительных мюонов во всех образцах. Приведенные в таблице 2 значения остаточной поляризации в ВТСП нормированы на остаточную поляризацию в бромформе и в графите соответственно для положительных и отрицательных мюонов.

Значения остаточной поляризации положительных мюонов в ВТСП, полученные нами, не противоречат измерениям других авторов (см., например, ^{15/}). Во всех образцах наблюдается сильная деполяризация отрицательных мюонов в $1S$ -состоянии кислорода. В $Bi_2CaS_2Cu_2O_{8-\delta}$ остаточная поляризация в три раза, а в остальных образцах примерно в пять раз меньше максимально возможной. При фурье-анализе в диапазоне частоты до 14 МГц не обнаружены другие частоты, кроме частоты, соответствующей прецессии свободного спина мюона во внешнем магнитном поле. Наблюдаемая сильная деполяризация отрицательных мюонов в ВТСП может быть обусловлена как действительной потерей поляризации из-за быстрых релаксационных процессов, так и тем, что в ВТСП существует несколько неэквивалентных положений атома кислорода. Соответственно, спин мюонов захватившимся кислородом в некоторых положениях по ряду причин может прецессировать на частотах больших, чем 14 МГц. Настоящие данные не позволяют выяснить истинные причины сильной потери поляризации отрицательных мюонов. Однако поиск недостающей поляризации отрицательных мюонов в ВТСП представляется важным, поскольку она может быть обусловлена особенностями строения кристалла ВТСП.

Литература

1. T. Suzuki, D.F. Measday, J.P. Roalsving. Phys.Rev., 635, 2212, 1980.
2. В.С.Евсеев, А.И.Климов, Т.Н.Мамедов, А.В.Пирогов, В.С.Роганов, В.И.Селиванов. Препринт ИАЭ, ИАЭ-3242/2, Москва, 1980.
3. В.А.Соменков и др. Письма в ЖЭТФ, т.46, вып.9, 359, 1987.
4. T.von Egidi, F.J.Hartman. Phys.Rev., A26, 2282, 1982.
5. Д.Т.Бежитадзе и др. Препринт ОИЯИ ДП4-89-455, Дубна, 1989.
В.Г.Гребинник и др. Сообщение ОИЯИ ДП4-88-667, Дубна, 1988.
V.N.Duginov et al. Краткое сообщение ОИЯИ, № 4(30)-88, Дубна, 1988, с.63.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 марта 1990 года.