

ПОДАВЛЕНИЕ МЮОННОЙ РЕЛАКСАЦИИ В ЖИДКОМ ${}^4\text{He}$ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

Д.Г.Ещенко, Е.П.Красноперов, С.Г.Барсов, А.Л.Геталов,
Л.А.Кузьмин, В.П.Коптев, С.М.Микиртычянци, Г.В.Щербакон

При увеличении внешнего электрического поля до 700 В/см исчезает затухание мюонной прецессии в жидком гелии.

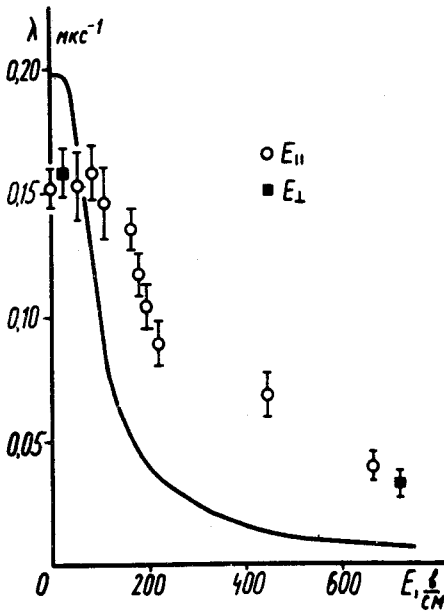
В работе ¹ было обнаружено затухание прецессии мюонного спина в жидком ${}^4\text{He}$. В рамках теории спиновой релаксации при диффузионном движении частиц скорость деполяризации — λ должна уменьшаться с увеличением коэффициента диффузии ($\lambda \sim D^{-1}$) за счет усреднения локальных магнитных полей. В сверхтекучем гелии с понижением температуры происходит увеличение скорости мюонной релаксации, хотя подвижность заряженных частиц — b , как известно, растет ². Увеличение скорости релаксации с ростом коэффициента диффузии можно объяснить предположив, что деполяризация происходит в результате направленного движения мюона к некоторому центру деполяризации. Центрами деполяризации могут быть частицы мюонного трека: электроны, отрицательно заряженные ионы гелия и атомы ортогелия.

В работе предпринята попытка выяснить — какие частицы, заряженные или нейтральные, осуществляют мюонную релаксацию. Эксперимент проводился на специально разработанной низкофоновой установке с холодными сцинтилляторами ³. В этой конструкции пластиковые сцинтилляторы расположены внутри вакуумного объема криостата и охлаждены до температуры ≈ 100 К. Систематическая ошибка измерения скорости затухания прецессии не превышает $0,02 \text{ мкс}^{-1}$. Электрическое поле создавалось с помощью ряда плоских проволочных сеток, расположенных внутри камеры криостата. В качестве материала сеток использовалась тонкая (0,1 мм) проволока из немагнитной нержавеющей стали. Расстояние между сетками составляло 9 мм, а между соседними проволоками в ряду — 2 мм. Общее число оставок мюонов в сетках 2%. Эксперимент по влиянию электрического поля на параметры мюонной прецессии был выполнен для температур 4,2; 2,0 и 1,6 К. Функция поляризации описывалась одной экспонентой $P(t) = \exp(-\lambda t)$.

С увеличением напряженности электрического поля наблюдалось уменьшение скорости деполяризации. В He-I при изменении E от нуля до $6 \cdot 10^3$ В/см скорость деполяризации уменьшается с $0,066 \text{ мкс}^{-1}$ до $0,029 \text{ мкс}^{-1}$. В сверхтекучем гелии подавление релаксации проявляется существенно ярче. Так при $T = 2$ К λ уменьшается с $0,128 \text{ мкс}^{-1}$ до $0,032 \text{ мкс}^{-1}$ соответственно. Отметим, что при снятии электрического поля λ возрастает до прежнего значения.

На рисунке изображена зависимость скорости деполяризации от электрического поля для $T = 1,6$ К. Измерения проводились при двух ориентациях электрического поля: параллельно (E_{\parallel}) и перпендикулярно (E_{\perp}) мюонному пучку. Эксперимент показал, что λ не зависит от ориентации поля. В диапазоне полей $0 \div 150$ В/см скорость деполяризации практически постоянна. При дальнейшем увеличении E происходит резкое уменьшение λ , и в полях больше 700 В/см скорость деполяризации находится на пределе разрешения μSR установки. Наблюдаемую температурную и полевую зависимость релаксации можно объяснить предположив, что на последней стадии торможения (термализации) мюона электроны, возникающие при ионизации гелия, оказываются на небольшом расстоянии от мюона ($\lesssim 10^{-4}$ см). Под действием кулоновских сил электрон сближается с мюоном. В результате происходит уменьшение асимметрии мюонной прецессии либо за счет магнитных взаимодей-

ствий, либо за счет образования атома мюония — Mu . Внешнее электрическое поле препятствует сближению частиц и тем самым подавляет релаксацию. Магнитное взаимодействие ($\mu_B \cdot r^{-3}$) существенно на расстоянии $r_0 \lesssim 10^{-7}$ см, а образование мюония происходит на еще меньших расстояниях. Однако в экспериментах при $T > 1,5$ К прецессия на мюониевой частоте не наблюдается¹. По-видимому, из-за пространственного распределения электронов время образования Mu оказывается случайным, и разброс начальных фаз мюониевой прецессии превышает 2π .



Зависимость от электрического поля скорости мюонной релаксации в жидком ⁴He при $T = 1,6$ К. Сплошная линия — модельный расчет

Будем описывать мюонную прецессию в виде $A = P(t) \cos(\omega t + \varphi)$, где $P(t)$ — функция поляризации. Рассчитаем $P(t)$ в следующей модели. Пусть при расстояниях между мюоном и электроном больших, чем $r_0 = 10^{-7}$ см, поляризация мюона равна 1, а при расстояниях меньших, чем r_0 , поляризация обращается в нуль. Время сближения частиц с расстояния r_0 ($t_0 = r_0^3 / 3be \leq 2,5 \cdot 10^{-9}$ с) меньше временного разрешения μSR спектрометра, поэтому можно считать, что потеря поляризации мюона происходит при $r = 0$. Тогда в момент времени t доля деполаризованных мюонов составляет $\int_0^{r(t)} W(\xi) d\xi$, а функция поляризации определяется выражением

$$P(t) = 1 - \int_0^{r(t)} W(\xi) d\xi, \quad (1)$$

где $W(\xi)$ — функция пространственного распределения электронов относительно мюона, а $r(t)$ — расстояние, с которого частицы сближаются за время t . В качестве простейшего приближения $W(\xi)$ принималось в виде трехмерной гауссовой функции

$$W(\xi) = \frac{4\xi^2}{\Delta^3 \sqrt{\pi}} \exp(-(\xi/\Delta)^2). \quad (2)$$

Сближение мюона и электрона описывалось уравнением взаимного вязкого движения

$$\frac{dr}{dt} = -b(T)e \frac{r}{r^3} + b(T)E, \quad (3)$$

где r — радиус вектор, соединяющий частицы, $b(T)$ — суммарная подвижность анионов и катионов. В этом уравнении опущен диффузионный член, поскольку расстояние, с которого сближаются частицы за время жизни мюона составляет $r_c = (3bet)^{1/3} \leq 5 \cdot 10^{-5}$ см, что значительно меньше длины Онсагера $r_c = e^2/kT \approx 10^{-7}$ см. При $E = 0$ экспериментальная функция поляризации в He-I аппроксимировалась выражением ¹ и был определен параметр Δ в распределении (2). Он оказался равным $\Delta = 6,7 \cdot 10^{-5}$ см. Для этого значения Δ была рассчитана зависимость $\lambda(T)$ в сверхтекучем гелии. Качественно модель верно описывает рост λ при понижении температуры, однако вычисленные значения λ заметно выше экспериментальных при $T \leq 1,8$ К. При $E \neq 0$ уравнение (3) решалось методом Рунге—Кутты. Численные значения $P(t)$ аппроксимировались экспонентой. Полученная таким образом зависимость λ от средней напряженности электрического поля при $T = 1,6$ К показана на рисунке. Характерное значение электрического поля, при котором λ уменьшается наполовину, в эксперименте в два раза больше расчетного значения. С помощью однопараметрической функции распределения (2) нельзя устранить наблюдаемое расхождение. По-видимому, $W(\xi)$ существенно отличается от гауссовой функции (2). Правда, нельзя сбрасывать со счета возможность замедления кинетики сближения частиц на малых расстояниях. Заметим, что функция распределения электронов может быть найдена из экспериментальных значений $dP(t)/dt$. Определению вида $W(\xi)$ будет посвящена отдельная работа.

Таким образом, причиной мюонной релаксации в жидком ⁴He, по-видимому, являются отрицательные частицы, образовавшиеся при термализации мюона. Обнаруженный эффект открывает возможность наблюдения мюония и извлечения с помощью электрического поля холодных (тепловых) мюонов из He-II при $T \lesssim 0,5$ К.

Авторы выражают благодарность Н.А.Черноплекову и А.А.Воробьеву за поддержку работы, Ю.М.Кагану и И.И.Гуревичу за полезное обсуждение результатов, В.Г.Сторчаку за помощь в проведении измерений.

Литература

1. Красноперов Е.П., Сторчак В.Г., Барсов С.Г. и др. Письма в ЖЭТФ, 1985, 42, 263.
2. Шликин В.Б. УФН, 1977, 121, 457.
3. Красноперов Е.П., Ещенко Д.Г. Препринт ИАЭ-4392/9, 1987.

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

Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
31 октября 1988 г.