

СПИНОВАЯ ДЕПОЛЯРИЗАЦИЯ МЮОНОВ В ^4He

*Е.П.Красноперов, В.Г.Сторчак, С.Г.Барсов,
А.Л.Геталов, С.П.Круглов, Л.А.Кузьмин,
С.М.Микиртычьянц, Г.В.Щербаков*

Обнаружено затухание прецессии спинов положительных мюонов в жидком гелии. В нормальном состоянии скорость деполяризации составляет $\lambda = 0,08 \text{ мкс}^{-1}$, а в сверхтекучем состоянии она увеличивается с понижением температуры и при $T = 1,5 \text{ К}$ составляет $\lambda = 0,15 \text{ мкс}^{-1}$. В He-II помимо этого процесса наблюдается быстрая деполяризация с характерным временем $\tau \simeq 0,5 \text{ мкс}$.

После безуспешных попыток обнаружить мюоний в жидком гелии 1 , возник скептицизм в перспективности применения метода мюонной спиновой релаксации для исследования ^4He , у которого электронный и ядерный спины равны нулю. Однако, благодаря своему положительному заряду, мюоны могут образовывать связанное состояние с атомами исследуемого вещества и в таком состоянии спиновая релаксация вполне возможна. По-видимому, такую природу имеет обнаруженное авторами 2 затухание мюонной прецессии в твердом параводороде, содержащем менее 2% орто-молекул.

В данной работе изучены параметры прецессии спинов мюонов в нормальном (He-I) и в сверхтекучем (He-II) гелии. Эксперименты выполнялись на μ -мезонном канале синхротронного ускорителя ЛИЯФ АН СССР с использованием установки, описанной в работе 2 . Гелий заливался в низкотемпературную камеру криостата, изготовленную из фольги нержавеющей стали толщиной 45 мкм. Отношение "эффективной" толщины всех стенок криостата к толщине гелиевой мишени не превышало 0,15. Толщина сцинтиллятора стартового счетчика $\tau = 1,7 \text{ мм}$. Температура гелия регулировалась с помощью мембранного вакуостата, а контролировалась по давлению насыщенных паров и с помощью двух угольных параметров, расположенных в верхней и в нижней частях мишени. Дрейф температуры во время экспе-

риментов не превышал 10 мК. Поперечное к оси пучка мюонов магнитное поле $H = 286$ Э, необходимое для наблюдения прецессии спинов, создавалось парой катушек Гельмгольца. Относительная однородность поля по образцу и его стабильность были на уровне 10^{-3} .

Спиновая прецессия описывалась обычным для движущегося мюона выражением

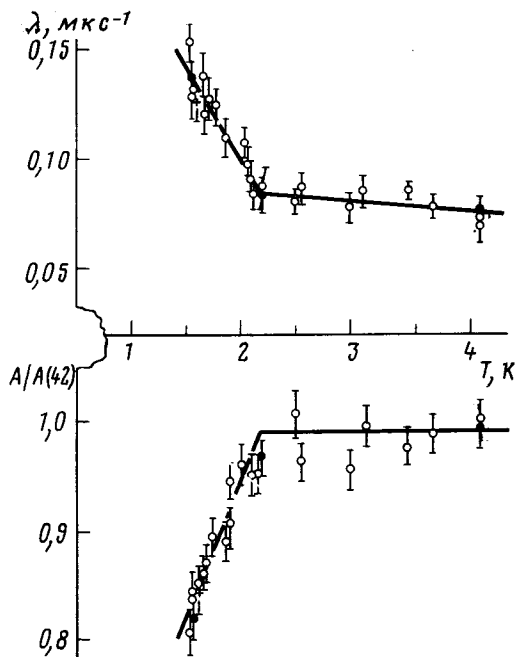
$$n(t) = A e^{-\lambda t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где A — коэффициент асимметрии $\mu \rightarrow e$ распада, зависящий от геометрии эксперимента; λ — скорость затухания прецессии (скорость деполяризации); ω и φ — частота и фаза прецессии.

На верхней части рисунка приведена температурная зависимость скорости деполяризации. Для гелия в нормальном состоянии можно считать, что скорость деполяризации практически постоянна. Наблюдаемое значение $\lambda \approx 0,08$ мкс $^{-1}$ нельзя отнести к аппаратным эффектам, поскольку для жидкого водорода в тех же экспериментальных условиях скорость деполяризации в два раза меньше². Отметим, что примерно такое же значение λ получено в работе¹ при $T = 2$ и $4,2$ К.

В сверхтекучем состоянии гелия ($T < 2,17$ К) скорость деполяризации возрастает с понижением температуры и составляет $\lambda = 1,55$ мкс $^{-1}$ при $T = 1,4$ К.

На нижней части рисунка изображена температурная зависимость параметра асимметрии, нормированного на значение A при $T = 4,2$ К. Хотя в различных экспериментах параметр A ($T = 4,2$ К) изменялся от 0,229 до 0,236, но его относительные температурные изменения описываются единой закономерностью, показанной на рисунке. В He-I параметр A практически не изменяется, а при охлаждении He-II наблюдается монотонное уменьшение асимметрии. Это обстоятельство, по-видимому, не связано с образованием мюония. Дело в том, что попытка обнаружить мюоний не увенчалась успехом. Соответствующая амплитуда не превышала 1,5 % от амплитуды мюонной частоты и была сравнима с уровнем фона.



Зависимость от температуры скорости деполяризации — λ и асимметрии — A : \circ — естественный гелий, \bullet — гелий с содержанием кислорода $2 \cdot 10^{-7}$, $+$ — после напуска в криостат воздуха

С другой стороны оказалось, что в He-II затухание мюонной прецессии на начальном участке (≈ 1 мкс) не описывается одной экспонентой (1) как для He-I. Численный анализ выявил наличие "быстрой" деполяризации с характерной скоростью $\lambda = 2$ мкс $^{-1}$. Параметр асимметрии "быстрой" деполяризации равен нулю в He-I и монотонно растет при охлаждении He-II, достигая значения $a_f = 0,03$ при $T = 1,5$ К.

Известно ³, что подвижность зарядов в гелии имеет температурную зависимость, схожую с изображенной на рисунке зависимостью $\lambda(T)$. Можно было предположить, что деполяризация мюонов в гелии осуществляется за счет захвата мюонов парамагнитными примесями, такими как кислород¹⁾ ($\mu \approx 0,5 \mu_B$), а температурные особенности связаны с изменением коэффициента диффузии. С целью выяснения роли примесей был приготовлен жидкий гелий с содержанием кислорода и азота менее $2 \cdot 10^{-7}$. Как видно из рисунка и в естественном, и в очищенном гелии скорость деполяризации одна и та же. В следующем эксперименте в сверхтекучий гелий был напущен воздух в количестве 15 л. И в этом случае скорость деполяризации не изменилась в пределах ошибки измерений. Если предположить, что мюоны двужутся в гелии без потери поляризации, а встретив парамагнитный центр (O_2) мгновенно деполяризуются, то приняв коэффициент диффузии в He-I таким же, как для положительных зарядов ($D = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$) ³, из соотношения $\lambda^2 = D$ легко найти расстояние между центрами деполяризации $l = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ см}$. Эта оценка показывает, что мелкодисперсная взвесь воздуха вряд ли является причиной деполяризации. Действительно, для частиц с размером $\approx 0,01 \text{ мкм}$ содержание кислорода должно быть $> 10^{-3}$, что маловероятно. Более того, в сверхтекучем состоянии происходит естественная очистка жидкого гелия, и скорость деполяризации, казалось бы, должна была падать. Однако, можно предположить, что в жидком гелии неизменно присутствуют молекулы кислорода (не взвесь) в количестве $10^{-7} - 10^{-8}$. Тогда, если деполяризация, обусловлена захватом мюона молекулой кислорода, т. е. динамическое сужение линии при движении спинов не существенно, то этим можно объяснить наблюдаемую зависимость $\lambda(T)$ и ее хорошую воспроизводимость.

Альтернативным механизмом деполяризации является образование ионов $He \mu^+$ или $He_2 \mu^+$, у части которых возбуждены электронные состояния. Благодаря разнице магнитных взаимодействий возбужденных электронов с мюоном, спин мюона оказывается в слабом локальном магнитном поле, которое тем меньше, чем ближе электроны к основному состоянию. В рамках такого механизма увеличение λ в He-II и появление "быстрой" деполяризации происходит за счет увеличения времени жизни возбужденных состояний в сверхтекучем гелии ⁴.

Исследования гелия, очищенного с помощью сверхтекучего фильтра, позволяет выяснить истинную причину наблюдаемого эффекта.

Авторы выражают благодарность С.Т.Беляеву и И.И.Гуревичу за интерес к работе и ее поддержку; Б.И.Савельеву, Д.Г.Ещенко и В.А.Гордееву за техническую помощь; А.А.Маркову за хроматографический анализ гелия; В.П.Смилге за обсуждения.

Литература

1. Crane T.W. et al. Phys. Rev. Lett., 1974, 33, 572.
2. Барсов С.Г., Геталов А.Л., Гордеев В.А. и др. Письма в ЖЭТФ, 1985, 41, 275.
3. Шишкин В.Б. УФН, 1977, 121, 457.
4. Stockton M., Keto I.W., Fitzsimmons W.A. Phys. Rev. Lett., 1970, 24, 654.

Институт атомной энергии

им. И.В.Курчатова

Институт ядерной физики

им. Б.П.Константинова Академии наук СССР

Поступила в редакцию

20 августа 1985 г.

¹⁾ Другие возможные примеси: 3He , N_2 , H_2 — не существенны, так как обладают только ядерным магнетизмом.