

ЭФФЕКТ ПАШЕН - БАКА ДЛЯ АТОМА МЮОНИЯ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ АЗОТЕ

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

Измерена поляризация мюонов в зависимости от напряженности продольного магнитного поля в твердом азоте. Показано, что энергия сверхтонкого взаимодействия (СВ) атома мюония в азоте в два раза меньше вакуумного значения. В малых полях поляризация мюонов оказывается меньше $1/2$, что, по-видимому, обусловлено ядерным СВ.

При термализации мюонов в некоторых веществах с большой вероятностью происходит образование атома мюония (Mu) ¹. Состояние атома мюония как модели атомарного водорода представляет значительный интерес для изучения взаимодействия одноэлектронных атомов с кристаллической решеткой вещества. В работе ² была обнаружена быстрая деполяризация мюонов в конденсированном азоте. Причиной быстрой деполяризации мюонов может быть образование атома мюония, а также взаимодействие мюонов с парамагнитными примесями. В работе ³ было показано, что парамагнитные примеси не являются причиной быстрой деполяризации мюонов в азоте.

Образование долгоживущего атома мюония можно обнаружить путем наблюдения триплетной прецессии мюония в перпендикулярном магнитном поле. Однако, в работах ^{2,3} наблюдалась прецессия только на мюонной частоте. Причиной отсутствия прецессии мюония с триплетной частотой, по-видимому, является тот факт, что за короткие времена ($\tau \sim 10^{-10}$ с) мюоний вступает в химическую реакцию с образованием диамагнитного соединения $N_2\mu^+$ ². Протекание реакции возможно лишь в том случае, если мюоний в конденсированном азоте находится в возбужденном состоянии ², поскольку энергия связи мюония в основном $1S$ состоянии (13,6 эВ) значительно превосходит энергию связи иона $N_2\mu^+$ (~ 5 эВ). Гипотеза возбужденного атома мюония получила подтверждение путем измерения зависимости начальной фазы мюонной прецессии от перпендикулярного магнитного поля ⁴. Однако, измерение малых величин сдвига фазы с большими систематическими ошибками имеет определенные трудности при интерпретации результатов. Измерение поляризации мюонов в зависимости от продольного магнитного поля позволит однозначно сделать вывод о состоянии атома мюония в конденсированном азоте.

При полной продольной поляризации пучка мюонов мюоний образуется в триплетном и синглетном состояниях. В триплетном мюонии деполяризации мюонов не происходит. Образование синглетного атома мюония приводит к полной деполяризации мюона за времена $t \sim 1/\omega$, где $\omega \sim 10^{10} \text{с}^{-1}$ - частота переходов между уровнями сверхтонкой структуры. В сильных продольных магнитных полях происходит разрыв связи магнитных моментов мюона и электрона (эффект Пашен - Бака), что приводит к запрету подобных переходов. Экспериментально наблюдаемым следствием является отсутствие деполяризации мюонов в сильных продольных полях. Область слабых магнитных полей, где доминирует СВ, отделена от области эффекта Пашена - Бака характерной напряженностью магнитного поля H_0 , определяемой из условия равенства энергии сверхтонкого взаимодействия и зеемановской энергии электрона и мюона. Для изолированного атома мюония $H_0^{\text{вак}} = 1858 \text{ Э}$ ⁵. При условиях отсутствия процессов переворота спина электрона мюония при взаимодействии со средой, а также 100% вероятности образования атома мюония, зависимость поляризации мюонов от продольного магнитного поля имеет следующий вид⁵

$$P = \frac{1 + 2x^2}{2 + 2x^2}, \text{ где } x = H/H_0. \quad (1)$$

Соотношение (1) содержит один параметр H_0 , который однозначно определяется из зависимости $P(H)$. Измерение критического магнитного поля H_0 позволяет определить основные параметры атома мюония - сверхтонкую константу A и радиус r_0 , используя соотношение

$$2(\mu_e - \mu_\mu)H_0 = hA \cong 32/3 \frac{\mu_\mu \mu_e}{r_0^3}, \quad (2)$$

где μ_e и μ_μ - магнитные моменты электрона и мюона⁵. Сравнение величин H_0 , A или r_0 , полученных при измерении поляризации мюонов в веществе, с вакуумными значениями позволяет определить состояние атома мюония в веществе.

Эксперимент выполнен на фазotronе ОИЯИ. Параллельное спину мюона магнитное поле варьировалось в диапазоне 0-4 кЭ. Относительная стабильность поля и его неоднородность по образцу были порядка 10^{-3} . Описание аппаратуры, методика приготовления образца, регулировки и измерения температуры приведены в работе². В качестве образца использовался азот с содержанием кислорода 10^{-6} .

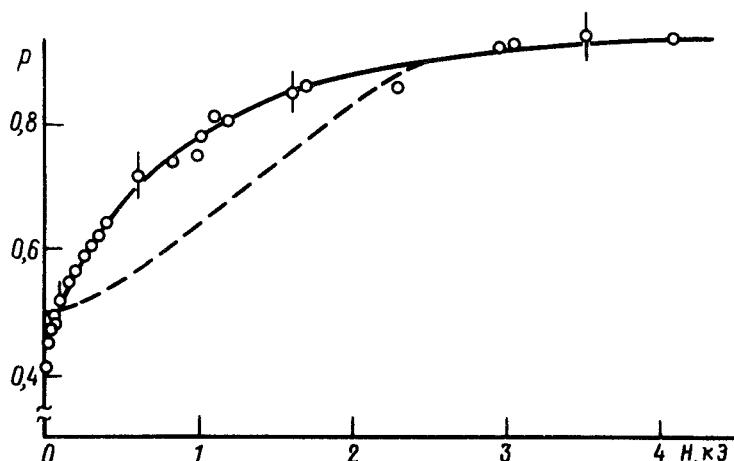


Рис. 1. Зависимость поляризации мюонов в кристаллическом азоте при $T = 28 \text{ К}$ от продольного магнитного поля. Пунктиром показана аналогичная зависимость для атома мюония в вакууме

На рисунке представлены результаты измерения поляризации мюонов в зависимости от напряженности продольного магнитного поля в кристаллическом азоте при температуре $T = 28$ К. Сплошная кривая в диапазоне полей 100-2000 Э рассчитана с использованием выражения (1). Величина критического магнитного поля оказалась равной $H_0 = 750 \pm 170$ Э, что в два раза меньше вакуумного значения. Для сравнения на рисунке пунктирной кривой приведена зависимость поляризации мюонов от продольного поля для изолированного атома мюония с $H_0 = 1585$ Э. Выражение (2) позволяет определить радиус Бора атома мюония в азоте: $r_0 = r_B (H_0^{\text{вак}} / H_0)^{1/3} = 0,64\text{\AA}$, где $r_B = 0,5\text{\AA}$ - радиус Бора изолированного атома мюония в $1S$ состоянии.

Таким образом, экспериментально установлено, что атом мюония в кристаллическом азоте находится в возбужденном состоянии. Необходимо отметить, что в продольном поле в твердом азоте наблюдается медленная деполяризация с характерной скоростью $0,2 \text{ мкс}^{-1}$. С ростом магнитного поля происходит уменьшение скорости деполяризации.

В диапазоне магнитных полей 0 - 100 Э поляризация мюонов в кристаллическом азоте оказывается меньше $1/2$. Подобный эффект наблюдался в ряде веществ, в частности, в корунде⁵. По-видимому, причиной уменьшения поляризации мюонов ниже $1/2$ в слабых продольных полях является ядерное СВ (ЯСВ)⁵, а именно, взаимодействие электрона мюония с ядерными магнитными моментами молекул азота. С учетом ЯСВ спиновый гамильтониан мюония с окружением имеет вид:

$$H = \hbar A \vec{S}_e \vec{S}_\mu - g_e \mu_B \vec{S}_e \vec{H} - g_\mu \mu_\mu \vec{S}_\mu \vec{H} + \hbar \sum_n A' \vec{S}_e \vec{S}_n - \sum_n g_n \mu_n \vec{S}_n \vec{H}, \quad (3)$$

где первый и четвертый члены описывают СВ и ЯСВ, а второй, третий и пятый - соответственно электронное, мюонное и ядерное зеемановские взаимодействия. Измерение зависимости поляризации мюонов от продольного магнитного поля позволяет оценить значение константы ЯСВ A' . В малых магнитных полях ЯСВ оказывается больше зеемановского взаимодействия. Увеличение продольного магнитного поля приводит к разрыву связи магнитного момента электрона мюония и ядерных магнитных моментов азота. Этот эффект аналогичен Пашен - Бак эффекту атома мюония, при котором рвется связь магнитных моментов электрона и мюона. Константа A' определяется из условия равенства зеемановской энергии и энергии ЯСВ при восстановлении поляризации до $P = 1/2$. Пренебрегая мюонным и ядерным зеемановскими взаимодействиями, получаем $A' \simeq 10^9 \text{ рад с}^{-1}$. Константа СВ в кристаллическом азоте оказывается на порядок больше.

Авторы выражают благодарность И.И.Гуревичу за поддержку работы, Н.В.Прокофьеву, В.Г.Фирсову за обсуждение результатов, В.Г.Ольшевскому, В.Ю.Помякушину за помощь в экспериментах.

Литература

1. Walker D.C. Muon and muonium chemistry. Cambridge: Univ. Press. 1983.
2. Гребинник и др. Письма в ЖЭТФ, 1990, 51, 7.
3. Гребинник и др. ФНТ, 1990, 16, 1184.
4. Duqinov V.N. et al. Reprint IAE-5030/9, 1990
5. Schenck A. Muon spin rotation spectroscopy. Bristol, Hilger, 1985.