

СПЕКТР ЭЛЕКТРОНОВ, ЛОКАЛИЗОВАННЫХ НАД ЖИДКИМ ^3He

А.П.Володин, В.С.Эдельман

Измерен спектр электронов, локализованных над ^3He . Получено, что отличие собственных частот от даваемых водородоподобной моделью, как и в случае ^4He , мало и не превосходит 3 – 4%. Подобие спектров электронов над ^3He и ^4He свидетельствует об идентичности структуры раздела жидкость – пар.

Как известно, электроны, локализованные над поверхностью жидкого гелия, имеют спектр, мало отличающийся от водородоподобного

$$E_l^0 = - \frac{mZ^2 e^2}{2\hbar^2 l^2}, \quad l = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где $Z = \frac{\epsilon - 1}{4(\epsilon + 1)}$, ϵ — диэлектрическая проницаемость среды [1, 2].

Экспериментально спектр таких электронов исследовался ранее при их локализации над ^4He [3]. Малые отличия измеряемых частот резонансных переходов от даваемых формулой (1) несут информацию о свойствах поверхности жидкости, поэтому представляет интерес установить спектр электронов над ^3He , чтобы иметь исходные данные для сопоставления моделей поверхности жидких ^3He и ^4He .

В [4] было обнаружено изменение проводимости системы электронов при возбуждении в ней резонансных переходов. Это дает удобный метод для спектроскопии поверхностных электронов, использованный в этой работе. Эксперимент ставился следующим образом. В герметичную камеру ϕ 45 мм, дно которой изолировано от корпуса, конденсировалось заданное количество ^3He . Поверхность гелия заряжалась электронами, эмиттируемыми вольфрамовым нагревным катодом (при его кратковременном $\sim 0,1$ сек, включении) до поверхностной плотности

$$n = U/4\pi ed, \quad (2)$$

где U — разность потенциалов, прикладываемая между дном и стенками камеры, d — толщина слоя гелия. Появление зарядов приводило к уменьшению добротности плоской спиральной катушки с наружным диаметром ~ 25 мм, расположенной над поверхностью гелия. Катушка являлась элементом резонансного контура, настроенного на частоту 7 МГц.

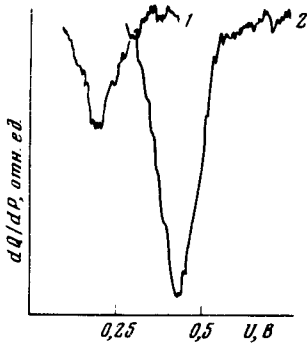


Рис. 1. Зависимость от удерживающего потенциала потерь, вносимых электронами, локализованными над ^3He в радиочастотный контур при их облучении на частоте 70,72 ГГц (1) и 71,67 ГГц (2). $T = 0,38$ К, глубина слоя жидкости 1,39 мм

В камеру вводилось СВЧ излучение от лампы обратной волны на частоте F , лежащей в диапазоне $70 \div 100$ ГГц. При уменьшении U частота резонансного перехода F_{1l} из-за штарк-эффекта, вызванного прижимающим полем $E_{\perp} = U/2d$, также уменьшается, и при определенном значении U совпадает с частотой F . При резонансе СВЧ излучение, взаимодействуя с электронами, приводит к изменению их подвижности и вклада в потери ВЧ контура. Изменение добротности контура регистрировалось путем измерения амплитуды сигнала 7 МГц, подаваемого на него. СВЧ излучение модулировалось на частоте ~ 1 кГц, и узкополосным усилителем с синхронным детектором выделялся сигнал на частоте модуляции, появляющийся в момент резонанса (рис. 1).

Целью эксперимента было измерение зависимостей от E_{\perp} частот перехода F_{1l} из основного в l возбужденное состояние. Поскольку непосредственно измеряемой величиной являлось U , то для определения F_{\perp} требовалось знать точное значение d и устранить контактные разности потенциалов между электродами. Для определения d при одной и той же частоте F измерения проводились дважды: при $d_1 \approx 1$ мм, и при $d_2 = d_1 + \Delta d \approx 3$ мм, где Δd вычислялось с точностью $\sim 0,4\%$ по диаметру камеры, плотности жидкого ${}^3\text{He}$ [5] и количеству дополнительно сконденсированного газа. По значениям напряжений U_1 и U_2 , при которых наблюдался резонанс, и Δd можно было вычислить d_2 с точностью $\sim 0,5\%$. Чтобы устранить контактные разности потенциалов между электродами, все детали внутри камеры покрывались пленкой платины. Контроль отсутствия паразитных потенциалов проводился по совпадению положения (в шкале E_{\perp}) линий резонансов при разных d и при значениях E_{\perp} , соответствующих $U \lesssim 1\text{В}$.

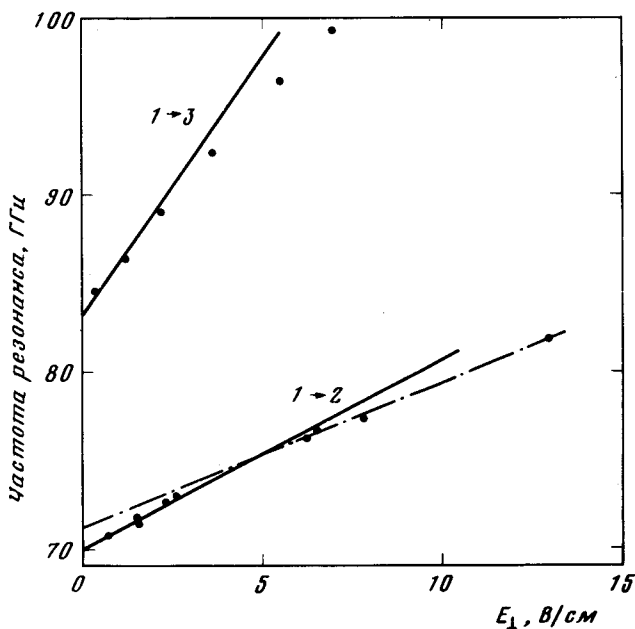


Рис. 2. Зависимость от удерживающего поля E_{\perp} частот перехода F_{12} и F_{13} для электронов, локализованных над жидким ${}^3\text{He}$. Сплошные прямые — расчетный штарковский сдвиг, составляющий 1,10 и 2,93 ГГц/(В/см) для переходов 1 → 2 и 1 → 3 соответственно. Штрихпунктир — прямая, проведенная через экспериментальные точки, измеренные при $E_{\perp} \gtrsim 6$ В/см

На рис. 2 приведены зависимости $F_{12}(E_{\perp})$ и $F_{13}(E_{\perp})$. Производная $(dF_{12}/dE_{\perp})_{E_{\perp} \rightarrow 0}$ практически совпадает с ожидающимся штарковским

сдвигом $\frac{\Delta F_{12}}{E_{\perp}} = \frac{e}{2\pi\hbar} (\langle x \rangle_2 - \langle x \rangle_1) = 1,10$ ГГц·см/В, где средние значения координат вычислены для водородоподобной модели (рис. 2).

Для перехода 1 → 3 различие этих величин невелико, $\sim 10\%$, и, по-видимому, может быть объяснено тем, что в этом случае отклонение от линейной зависимости должно наступать при значительно меньших полях, чем для перехода 1 → 2. Отметим, что в [3] измеренное для электронов над ${}^4\text{He}$ значение dF_{12}/dE_{\perp} на 10% меньше предсказанного. По-видимому, это связано с тем, что в [3] резонансы наблюдались лишь при $E_{\perp} \gtrsim 6$ В/см, где и в нашем случае dF_{12}/dE_{\perp} заметно меньше его значения при $E_{\perp} \rightarrow 0$ (рис. 2).

Линейная экстраполяция к $E_{\perp} = 0$ дает $F_{1,2}(0) = 69,9 \pm 0,1$ и $F_{1,3}(0) = 83,3 \pm 0,2$ ГГц. Использувавшийся ${}^3\text{He}$ согласно масс-спектроскопическому анализу имел $(0,3 \pm 0,1)\%$ примеси ${}^4\text{He}$. Вводя поправку на изменение ϵ , вычисленную по данным работ [5, 6], получим для чистого ${}^3\text{He}$ частоты перехода $69,8 \pm 0,15$ и $83,15 \pm 0,25$ ГГц. Как и в случае электронов над ${}^4\text{He}$, наблюдаемые частоты перехода несколько выше теоретических значений 67,6 и 80,1 ГГц, определенных по (1) с $\epsilon({}^3\text{He}) = 1,042764$ [6].

В работе [3] для объяснения смещения частот перехода, измеренных для электронов, локализованных над ${}^4\text{He}$, был использован модельный потенциал, содержащий два параметра: $V(x) = -Ze/(x + \beta)$ при $x > 0$, т. е. над жидкостью, и $V(x) = V_0$ при $x < 0$. В этой модели смещение собственных частот дается формулой

$$\delta F_l = \frac{\hbar}{\pi m} \left\{ \beta - \left(\frac{\hbar^2}{2mV_0} \right)^{1/2} \right\} [\psi_l^0(0)]^2, \quad (3)$$

где $\psi_l^0(x)$ — водородоподобная волновая функция (т. е. при $V_0 = \infty$, $\beta = 0$). Согласно (3), отношение $\delta F_{1,3}/\delta F_{1,2} = 208/189 = 1,10$. Экспериментально измеренное значение равно $1,4 \pm 0,2$. Таким образом, модель (3) недостаточно хорошо описывает эксперимент. Однако, так как она уже использовалась ранее в [3], определим параметр β и для ${}^3\text{He}$, используя смещение частоты, усредненное для уровней с $l = 2$ и 3. Действуя так, для выражения в фигурных скобках найдем $\{ \} = -0,8 \text{ \AA}$. Принимая теоретическое значение $V_0 = 0,9 \text{ эВ}$ [1], получим $\beta_3 = 1,25 \pm 0,15 \text{ \AA}$ — значение, близкое к $\beta_4 = 1,04 \text{ \AA}$ для ${}^4\text{He}$ [3].

Как видно из сопоставления полученных нами и в [3] результатов, трудно ожидать существенного различия структуры поверхностей жидких ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ и присутствия на границе раздела жидкость — пар переходной области с размерами больше атомных, как это предсказано в недавних расчетах [7, 8].

П.М.Капице авторы признательны за стимулирующий интерес, М.С.Хайкину за многочисленные обсуждения работы, Г.С.Чернышову за техническую помощь.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
17 октября 1979 г.

Литература

- [1] M.W.Cole. Phys. Rev., B2, 4239, 1970.
- [2] В.Б.Шишкин, Ю.П.Монарха. ФНТ, I, 957, 1975.
- [3] C.C.Grimes, T.R.Brown, M.L.Burns, C.L.Zipfel. Phys. Rev., B13, 140, 1976.
- [4] В.С.Эдельман. ЖЭТФ, 77, 673, 1979.
- [5] E.C.Kerr, R.D.Taylor. Ann. Phys., 20, 450, 1962.
- [6] H.A.Kierstead. J. Low Temp. Phys., 24, 497, 1976.
- [7] L.Senbetu, Chia-Wei-Woo. Phys. Rev., B18, 3251, 1978.
- [8] F.D.Mackie, Chia-Wei-Woo. Phys. Rev., B18, 529, 1978.