

## НАБЛЮДЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ, ЛОКАЛИЗОВАННЫХ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЖИДКОГО ${}^3\text{He}$

*В.С.Эдельман*

Исследован циклотронный резонанс электронов, локализованных над поверхностью жидкого  ${}^3\text{He}$ . Измерения проведены при температуре гелия 0,37К на частоте 18,76 Гц. Обнаружено падение времени релаксации электронов при увеличении прижимающего поля, которое как для случая электронов, локализованных над  ${}^3\text{He}$ , так и над  ${}^4\text{He}$ , удовлетворительно объясняется их взаимодействием с тепловыми колебаниями поверхности гелия.

Образующие двухмерный проводник электроны, локализованные над поверхностью жидкого  ${}^4\text{He}$ , благодаря электростатическому взаимодействию с диэлектриком, наблюдались во многих работах [1]. Механизм образования такой системы не связан со спецификой жидкого  ${}^4\text{He}$ , и подобная локализация электронов должна иметь место над жидким  ${}^3\text{He}$ , жидкими или твердыми He,  $\text{H}_2$ , и, возможно, над другими диэлектриками со сравнительно малым значением диэлектрической постоянной  $\epsilon$  [2]. В связи с этим нами были проведены опыты по наблюдению циклотронного резонанса для электронов, локализованных над поверхностью жидкого  ${}^3\text{He}$ .

Постановка эксперимента аналогична использовавшейся ранее в [3,4]. Отмеренное количество  ${}^3\text{He}$  (или  ${}^4\text{He}$ ) конденсировалось в вакуумно

плотный цилиндрический резонатор  $\phi$  20 мм и высотой 9 мм. Электроны извлекались из плазмы, создаваемой при включении разряда в газе, и удерживались прижимающим электрическим полем  $E$ , приложенным между изолированным дном резонатора и его корпусом. После выключения разряда производилось измерение прохождения волны частотой 18,76 Гц (мода  $TE_{111}$ ) через резонатор, связанный симметричным образом с двумя коаксиальными линиями. Пример зависимости сигнала, от приложенного по нормали к поверхности гелия магнитного поля  $H$ , демонстрирующий поглощение при циклотронном резонансе, представлен на рис. 1.

В отличие от случая  ${}^4\text{He}$ , когда после выключения разряда электроны могут находиться над поверхностью жидкости практически неограниченное время, при работе с  ${}^3\text{He}$  наблюдался скачкообразный частичный или полный уход электронов за случайный интервал времени, изменявшийся от нескольких секунд до десятков минут (рис. 1). Это явление, на наш взгляд, связано с возможностью перегрева и кипения  ${}^3\text{He}$  с образованием пузырьков.

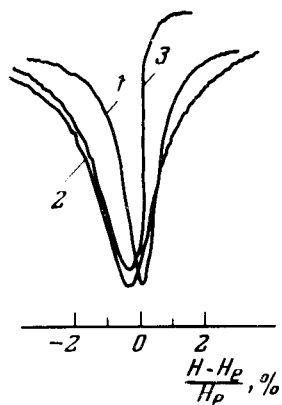


Рис. 1. Зависимость амплитуды сигнала частотой 18,76 Гц, проходящего через резонатор, от магнитного поля: 1 — прижимающее поле  $E = 90$ ; 2, 3 —  $E = 180$  в/см. Скачкообразное изменение сигнала на записи 3 связано с уходом электронов с поверхности  ${}^3\text{He}$ . Температура 0,37 К, глубина слоя  ${}^3\text{He}$  равна 0,97 мм. Характерный масштаб по вертикали — коэффициент прохождения в резонансе уменьшается приблизительно в два раза.  $H_e$  — поле циклотронного резонанса свободных электронов

Как и для случая электронов, локализованных над  ${}^4\text{He}$  [3], при увеличении напряженности прижимающего поля  $E$  наблюдались уширение и сдвиг по магнитному полю резонансных линий, соответствующий уменьшению эффективной массы (рис. 1). Зависимость полуширины линии циклотронного резонанса  $\Delta H$  от прижимающего поля приведена на рис. 2.

Чтобы уменьшить погрешность определения  $E$ , возникающую из-за неоднородности электростатического поля в объеме резонатора и неоднородной плотности заряда вдоль поверхности жидкости, измерения были проведены при глубинах гелия  $d \sim 1$  мм. Опыты проводились так, что после зарядки поверхности при максимальном значении  $E$  последовательные записи производились при уменьшении прижимающего поля. Таким образом, поверхностная плотность электронов  $n$  поддерживалась такой, что над жидкостью электростатическое поле отсутствовало. В этом случае

$$n = V/4\pi de; \quad E = V/2d, \quad (1)$$

где  $V$  — разность потенциалов между электродами.

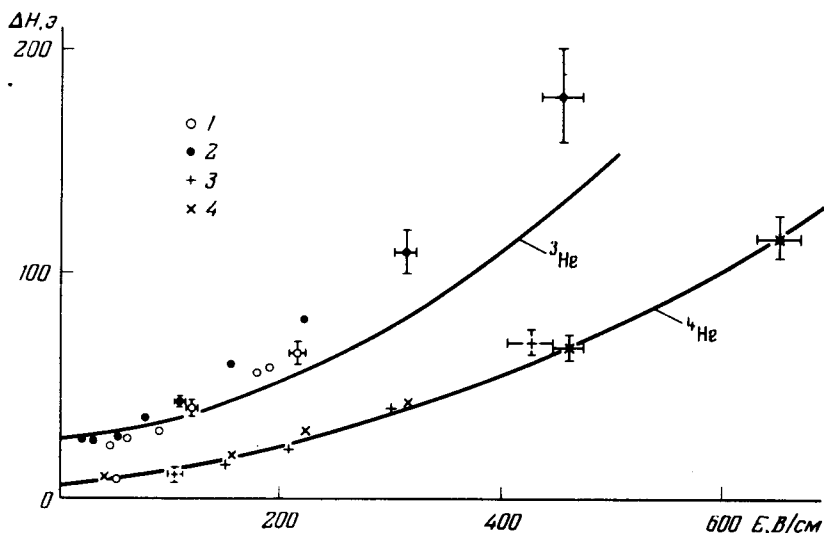


Рис. 2. Зависимость полуширины линии  $\Delta H$  циклотронного резонанса от прижимающего поля  $E$ : 1, 2 — электроны над слоем  $^3\text{He}$  глубиной 0,97 и 1,42 мм; 3, 4 — над  $^4\text{He}$  глубиной 0,70 и 0,99 мм соответственно. Сплошные кривые — расчет

Из-за малой глубины слоя гелия, уже небольшой наклон дна резонатора относительно горизонта может привести к значительной неоднородности  $E$ . Отъюстировать положение прибора удалось путем наблюдения зависимости от угла наклона  $\theta$  критического значения  $E_{\text{кр}}$ , при котором заряженная поверхность  $^4\text{He}$  становится неустойчивой [5]. Оказалось, что при непрерывно включенном разряднике  $E_{\text{кр}}$  линейно зависит от  $\theta$ , уменьшаясь в 1,5 + 2 раза при изменении  $\theta$  от 0 до  $\sim 1^\circ$ . Это позволило установить прибор так, что дно резонатора было параллельно поверхности жидкости с точностью  $\sim 1^\circ$ , что соответствовало возможным вариациям глубины гелия  $\sim 0,01$  мм, сравнимым с отклонениями поверхности нижнего электрода от плоскости. Заметим попутно, что значения  $E_{\text{кр}}$  для  $^4\text{He}$  были близки к предсказаниям теории [5], а для  $^3\text{He}$  оказались в 2 + 4 раза меньшими.

Ширина линии циклотронного резонанса при  $E \rightarrow 0$  для случая  $^3\text{He}$  практически полностью определяется рассеянием электронов на атомах газа. По измеренному значению  $\Delta H = 26$  э можно вычислить, что давление  $^3\text{He}$  в резонаторе равно 0,015 тор. (Непосредственно давление в резонаторе нами не измерялось; давление  $^3\text{He}$  в откачиваемой ванне, охлаждавшей резонатор, составляло 0,01 тор). Аналогично наблюдавшему ранее в [4] появлению узкой линии циклотронного резонанса при перегреве СВЧ полем системы электронов, локализованной над жидким  $^4\text{He}$ , это явление было обнаружено и для случая  $^3\text{He}$ . Линия циклотронного резонанса для свободных электронов имела ширину  $\sim 8$  э, в  $\sim 3$  раза меньшую, чем для поверхностных электронов. Расчет по формулам, приведенным в [6], дает для этого отношения близкое значение, равное 2,3.

Рассчитанное в соответствии с [7]<sup>1)</sup> значение  $\Delta H$  для  ${}^3\text{He}$  при  $E = 0$ , связанное с электрон-риплонным взаимодействием, составляет 1,8 э. Однако, при увеличении  $E$  электрон-риплонное взаимодействие быстро возрастает (рис. 2). При построении приведенной на рис. 2 теоретической кривой значения  $\Delta H$  вычислялись по формулам из [7], и к ним добавлялась постоянная величина, соответствующая рассеянию на газе, обеспечивающая совпадение расчета с экспериментом при  $E \rightarrow 0$ .

При значениях  $E \lesssim 200$  в/см вычисленная зависимость близка к измеренной, однако при больших  $E$  заметна тенденция более быстрого роста  $\Delta H$ , чем предсказывается теорией. Для случая  ${}^4\text{He}$  хорошее согласие с теорией наблюдается вплоть до полей  $\sim 600$  в/см. Такое различие для случаев  ${}^3\text{He}$  и  ${}^4\text{He}$  вполне естественно. Действительно, среднее значение поля сил изображения  $< \frac{e(\epsilon - 1)}{4(\epsilon + 1) z^2} \psi^2(z) >$  (здесь  $\psi(z)$  —

волновая функция основного состояния, зависящая от нормальной к поверхности координаты  $z$ ) составляет  $3,3 \cdot 10^4$  в/см для  ${}^4\text{He}$  и  $\sim 600$  в/см для  ${}^3\text{He}$ . Поэтому прижимающее поле мало возмущает волновую функцию электрона, локализованного над  ${}^4\text{He}$ , а при его локализации над  ${}^3\text{He}$  приводит к значительному уменьшению среднего расстояния до поверхности жидкости. Вследствие этого должно наблюдаться дополнительное возрастание электрон-риплонного взаимодействия.

Отметим в заключение, что мы наблюдали так же электроны, локализованные над поверхностью растворов  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$  с концентрацией  ${}^3\text{He}$  от долей до  $\sim 10\%$ .

М.С.Хайкину, А.Ф.Андрееву, В.В.Щикину, А.П.Володину автор благодарен за обсуждение работы, Г.С.Чернышеву — за техническую помощь.

Институт физических проблем  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
26 сентября 1977 г.

### Литература

- [1] R.S.Crandall. Surface Science, 58, 266, 1976.
- [2] M.W.Cole. Phys. Rev., 2, B4239, 1970.
- [3] В.С.Эдельман. Письма в ЖЭТФ, 24, 510, 1976.
- [4] В.С.Эдельман. Письма в ЖЭТФ, 25, 422, 1977.
- [5] Д.М.Черникова. ФНТ, 2, 1374, 1976.
- [6] T.R.Brown, C.C.Grimes. Phys. Rev. Lett., 29, 1233, 1972.
- [7] P.M.Platzman, G.Beni. Phys. Rev. Lett., 36, 626, 1976.

<sup>1)</sup> В формуле (19) работы [7] содержится численная ошибка, приводящая к завышенному в 2 раза значению подвижности.