

Академия наук СССР  
Журнал экспериментальной и теоретической  
физики

Том 35, вып. 5 (11), 1958 г.

H. J. Hall

*N. B. Brandt, V. A. Venttsel*

Н. Б. Брандт, В. А. Вентцель

ВЛИЯНИЕ ВСЕСТОРОННЕГО СЖАТИЯ НА ОСЦИЛЛЯЦИЮ  
МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ВИСМУТА ПРИ  
НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

## ВЛИЯНИЕ ВСЕСТОРОННЕГО СЖАТИЯ НА ОСЦИЛЛЯЦИЮ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ВИСМУТА ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Н. Б. Брандт, В. А. Вентцель

Исследовано влияние всестороннего сжатия давлением около 1000 атм на осцилляцию магнитной восприимчивости висмута в магнитном поле до 13 кОе при 4,2—1,6°К. По формулам Ландау оценен характер изменения тензора эффективных масс, граничной энергии Ферми  $E_0$ , фактора Динглия и концентрации электронов. Делаются предположения о характере энергетического спектра электронов у висмута.

В работах по исследованию влияния давления на гальваномагнитные свойства  $Vi$  [1-3] было высказано предположение о возможности наблюдения заметного влияния давления на квантовые осцилляции магнитной восприимчивости металлов в магнитном поле  $H$  при низких температурах даже в области не очень больших давлений. Такое исследование могло бы дать возможность определения характера деформации тензора эффективных масс у  $Vi$  при сжатии. Представляло также интерес сравнение с другими экспериментальными и с теоретическими работами, посвященными исследованию влияния давления на эффект де Гааза—ван Альфена [1-6].

Измерения проводились на монокристаллических образцах очень чистого  $Vi$  при трех основных ориентациях образца. Образцы укреплялись на специальном держателе внутри изотропной в магнитном отношении бомбы (рис. 1) [4], соединенной с подвесной системой торсионных весов. Давление создавалось методом Лазарева и Кан [7]. Однако для увеличения однородности давления вместо воды, которая обычно применялась ранее, нами использовались водные растворы этилового спирта, что позволило резко уменьшить величину неоднородных напряжений в сжатых образцах и приблизить условия опыта к условиям всестороннего сжатия [8]. Величина давления измерялась по удлинению бомбы при помощи простого индикатора, состоящего из двух узких плоских пружин, приваренных к верхней и нижней частям бомбы.

Для каждого образца снималась зависимость момента сил  $S$ , действующих на образец в постоянном магнитном поле, от направления магнитного поля в плоскости, перпендикулярной оси подвеса, а также зависимость  $S$  от напряженности поля при различных ориентациях образца при тем-

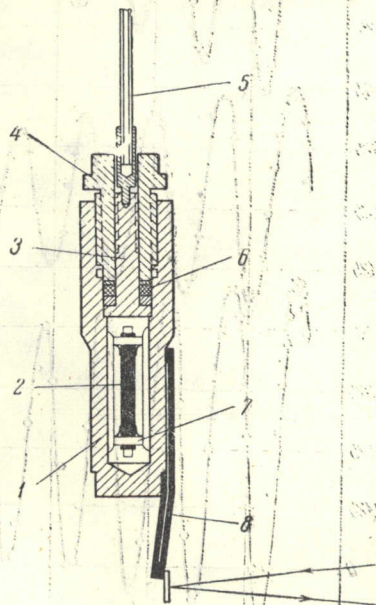


Рис. 1. Устройство бомбы: 1 — корпус, 2 — образец, 3 — грибок, 4 — пробка, 5 — стеклянный стержень, 6 — уплотняющие прокладки, 7 — держатель образца, 8 — индикатор давления с зеркальцем

пературах 4,2 и 1,6°К. Все эти измерения проводились на образцах, не подвергавшихся действию давления, при всестороннем сжатии давлением около 1000 атм и после снятия давления. Опыты с созданием повторных давлений, иногда до четырех раз, показали хорошую воспроизводи-

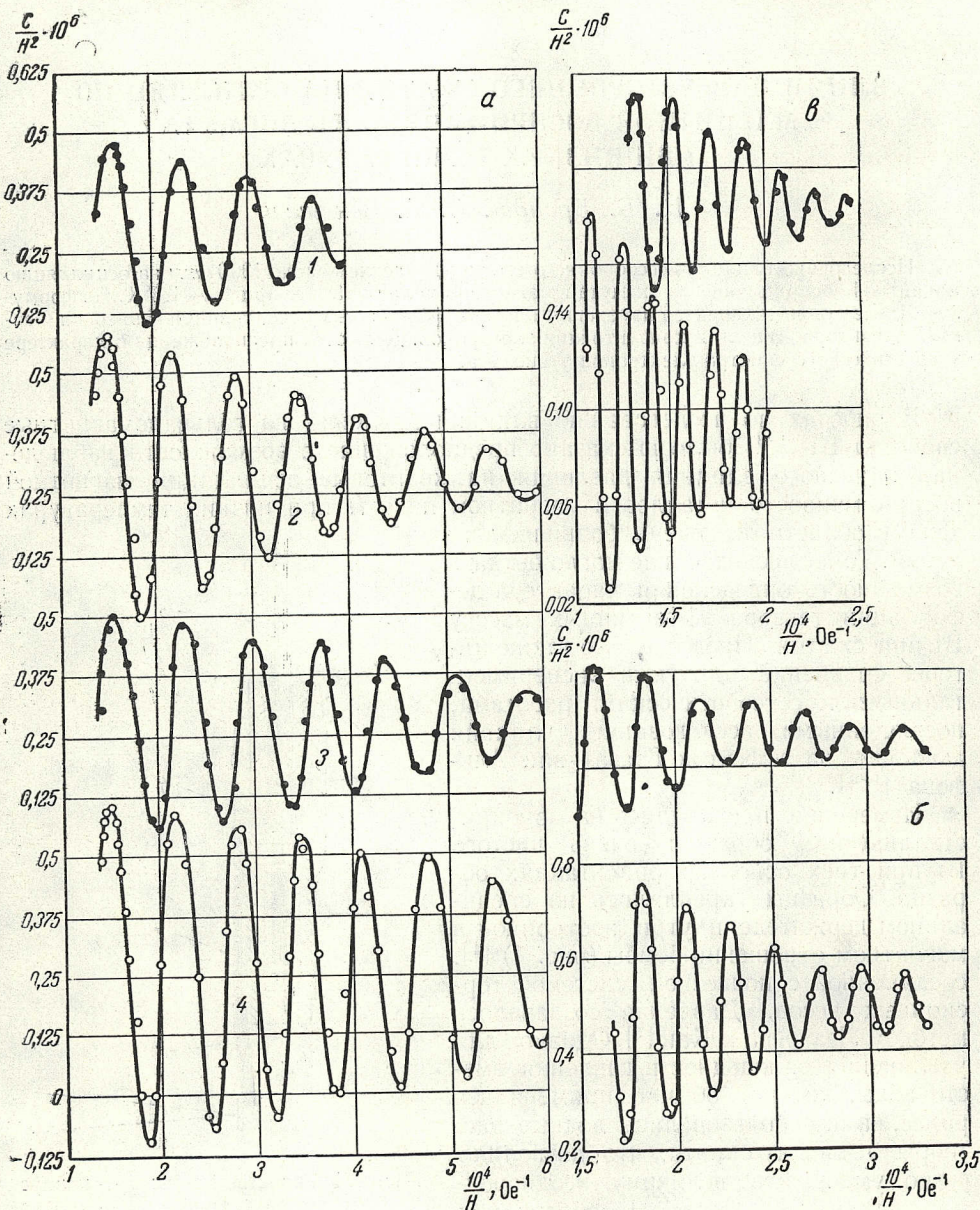


Рис. 2. Зависимость анизотропии восприимчивости  $V_i$  (главная и бинарная оси перпендикулярны оси подвеса) от напряженности магнитного поля:  $\odot$  —  $p = 0$ ,  $\bullet$  —  $p \sim 1000$  атм: а)  $\psi = 76^\circ$ , кривые 1 и 2 —  $T = 4,2^\circ$  К; кривые 3 и 4 —  $T = 1,6^\circ$  К; б)  $\psi = 170^\circ$ ,  $T = 1,6^\circ$  К; в)  $\psi = 175^\circ$ ,  $T = 1,6^\circ$  К

мость результатов. На рис. 2 представлены некоторые зависимости  $C/H^2 = \Delta\chi \cdot \sin \psi \cdot \cos \psi$  от  $1/H$ , где  $\Delta\chi$  — анизотропия магнитной восприимчивости, а  $\psi$  — угол между направлениями главной оси и магнитного поля. Как видно из рисунка, давление около 1000 атм вызывает уменьшение амплитуды осцилляции приблизительно на 30%, причем этот эффект несколько возрастает

при  $\psi \rightarrow 0$  и уменьшении  $H$ , а также уменьшение частоты осцилляций  $E_0/\beta$  (см. формулы Л. Д. Ландау, приведенные в [9]). Изменение частоты осцилляций при сжатии для различных значений  $\psi$  изображено на рис. 3. Кривая 1

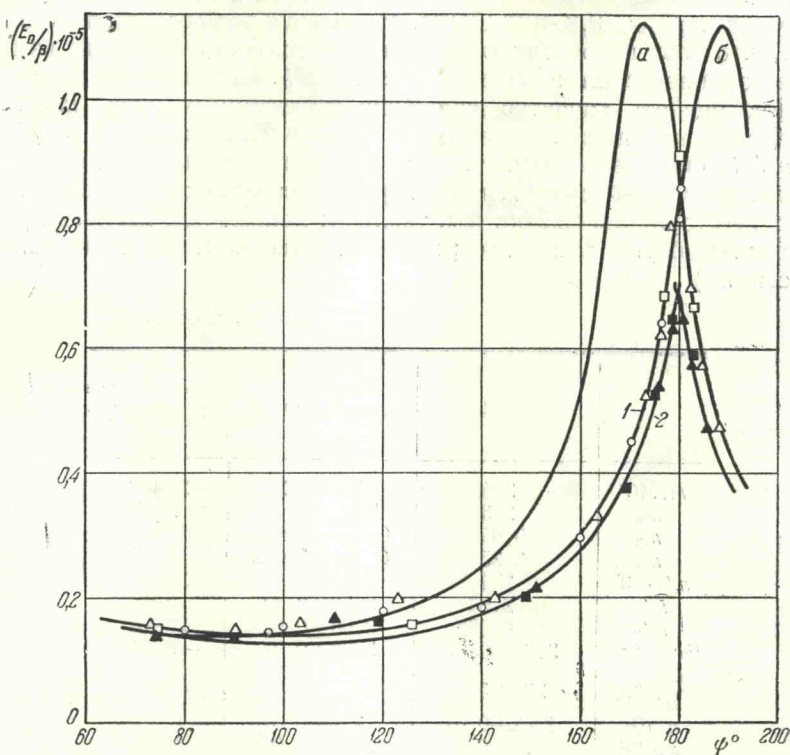


Рис. 3. Зависимость  $E_0/\beta \sim S_m$  у Вi (главная и бинарная оси перпендикулярны оси подвеса) от угла  $\psi$ .  $\odot$  —  $p = 0$ ,  $\triangle$  —  $p_1$  снято,  $\blacktriangle$  —  $p_2 \sim 1000$  атм,  $\square$  —  $p_2$  снято,  $\blacksquare$  —  $p_3 \sim 1000$  атм

относится к образцу, не подвергавшемуся давлению. Как видно из рисунка, на эту же кривую хорошо ложатся точки, полученные при измерениях на образце после снятия первого и повторных давлений. Кривые *a* и *b* построены по формулам, использованным в [9]. При исследовании двух других ориентаций образца также наблюдалось хорошее согласие экспериментальных зависимостей  $E_0/\beta$  от  $\psi$  с теоретическими кривыми, а изменение  $E_0/\beta$  при сжатии качественно согласовывалось с данными, представленными на рис. 4.

Таким образом, полученные результаты хорошо согласуются с трехэллипсоидной моделью поверхности Ферми для электронов, предложенной Шенбергом. Так как  $E_0/\beta$  пропорциональны экстремальным площадям сечения  $S_m$  поверхности Ферми плоскостью, перпендикулярной направлению магнитного поля [10], из рис. 4 можно заключить, что деформация поверхности Ферми у Вi при сжатии не является однородной [4].

Было обнаружено также, что изменение фазы осцилляции  $\Delta\chi$  при сжатии давлением 1000 атм не превышает  $\pm 10^\circ$ , а изменение анизотропии  $\Delta\chi_0$  постоянной части магнитной восприимчивости —  $\pm 2\%$ .

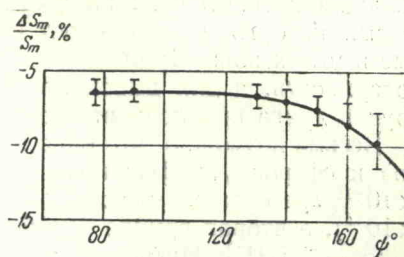


Рис. 4. Относительное изменение  $\Delta S_m / S_m$  при давлении  $\sim 1000$  атм

Как показывает расчет, величина  $\Delta\chi_0 = \chi_{\perp} - \chi_{\parallel}$  у  $Vi$  при гелиевых температурах соответствует анизотропии тензора эффективных масс для группы электронов, вызывающих эффект де Гааза—ван Альфена, однако вычисленные абсолютные значения  $\chi_{\perp}$  и  $\chi_{\parallel}$  отличаются от наблюдаемых на величину порядка  $0,8 \cdot 10^{-6}$  CGSM. Используя это обстоятельство и предполагая, что угол поворота эллипсоидов поверхности Ферми не изменяется при всестороннем сжатии более чем на 1—2%, на основании формул Ландау можно оценить характер изменения эффективных масс  $m_1, m_2, m_3$  и  $m_4$  (в системе координат, связанной с главными осями решетки  $Vi$ ) и  $m'_1, m'_2$  и  $m'_3$  (в системе координат, связанной с главными осями эллипсоида), граничной энергии Ферми  $E_0$ , концентрации электронов  $n$  и фактора Дингля  $x$  при всестороннем сжатии (см. таблицу; данные при давлении  $p = 0$  — по данным Шенберга [9] и нашим; значения масс даны в единицах электронной массы  $m_0$ ).

Таблица 1

	$p = 0$	$p = 1000 \text{ атм}$	Относительное изменение в % при сжатии
$m_1 \cdot 10^3$	2,4	$1,8 \pm 0,2$	$-25 \pm 10$
$m_2$	2,5	$2,55 \pm 0,12$	$2 \pm 5$
$m_3$	0,05	$0,056 \pm 0,003$	$12 \pm 5$
$m_4$	-0,25	$0,255 \pm 0,012$	$2 \pm 5$
$m'_1 \cdot 10^3$	2,4	$1,8 \pm 0,2$	$-25 \pm 10$
$m'_2$	2,53	$2,58 \pm 0,12$	$2 \pm 5$
$m'_3$	0,025	$0,03 \pm 0,001$	$20 \pm 5$
$E_0 \cdot 10^{14} \text{ эрг}$	$2,81 \pm 0,07$	$2,68 \pm 0,07$	$-5 \pm 5$
$E_0/k, \text{ }^\circ\text{K}$	$204 \pm 5$	$194 \pm 5$	$-5 \pm 5$
$n \cdot 10^5$	$1,42 \pm 0,07$	$1,275 \pm 0,075$	$-10 \pm 10$
$x, \text{ }^\circ\text{K}$	$1,7 \pm 0,1$	$2,18 \pm 0,05$	$28 \pm 10$

Хорошее количественное согласие величины изменения  $n$  при сжатии с данными работ [1-3] свидетельствует, по-видимому, о том, что у  $Vi$  существует лишь одна группа электронов, соответствующая модели Джонса — Шенберга, а характер деформации ее поверхности Ферми согласуется с основными представлениями Джонса [11], рассматривающего  $Vi$  как металл с неправильной структурой. Основываясь на этой модели, можно предположить, что у  $Vi$  могут существовать две группы дырок, поверхности Ферми которых представляют собой поверхности вращения, расположенные в углах зоны Бриллюэна. Для дырок одного типа имеется одна такая поверхность, а для дырок второго типа — две поверхности, переходящие друг в друга при повороте вокруг бинарной оси.

Весьма возможно, что одна группа дырок с поверхностью Ферми, близкой к сфероиду, эффективной массой  $\sim 0,002 m_0$  и энергией Ферми  $\sim 14 \times 10^{-12} \text{ эрг}$  связана с изотропной частью магнитной восприимчивости ( $0,8 \times 10^{-6}$ ), а вторая группа — с большим значением линейного члена в теплоемкости  $Vi$  [12]. Интересно отметить, что в опытах по циклотронному резонансу наблюдались дырки с массой  $\sim 0,0015 m_0$  [13].

В заключение выражаем благодарность Н. Е. Алексеевскому и А. А. Абрикосову за интерес к работе и ценные советы при обсуждении результатов, ст. механику С. Г. Обручникову за исключительное качество выполненных токарных и механических работ и Ю. В. Ерофееву за помощь при проведении измерений.

Московский государственный университет

Поступила в редакцию  
24 января 1958 г.;  
после переработки  
5 августа 1958 г.

## Литература

- [1] Н. Б. Брандт. Диссертация, МГУ, 1954.  
 [2] Н. Е. Алексеевский, Н. Б. Брандт. ЖЭТФ, 28, 379, 1955.  
 [3] Н. Е. Алексеевский, Н. Б. Брандт, Т. И. Костина. Изв. АН СССР, серия физич., 21, 790, 1957.  
 [4] Б. И. Веркин, Б. Г. Лазарев, И. М. Дмитренко. ЖЭТФ, 31, 558, 1956; 35, 328, 1958.  
 [5] И. М. Дмитренко, Б. И. Веркин, Б. Г. Лазарев. ЖЭТФ, 33, 287, 1957.  
 [6] А. М. Косевич. ЖЭТФ, 35, 249, 1958.  
 [7] Б. Г. Лазарев, Л. С. Кан. ЖЭТФ, 14, 470, 1944.  
 [8] Н. Б. Брандт, А. К. Томашик. ПТЭ, 2, 113, 1958; Журнал общей химии (в печати).  
 [9] D. Shoenberg. Phil. Trans. Roy. Soc., A245, 1, 1952; Proc. Roy. Soc., 170, 341, 1939.  
 [10] И. М. Лифшиц, А. М. Косевич. ДАН СССР, 96, 963, 1954; ЖЭТФ, 29, 330, 1955.  
 [11] H. Jones. Proc. Roy. Soc., 144, 225, 1934; 147, 396, 1934.  
 [12] П. Г. Стрелков, И. Н. Калинкина. ЖЭТФ, 34, 616, 1958.  
 [13] J. K. Calt, W. A. Jager, F. R. Merritt, B. Cetlin, H. W. Day, Jr. Phys. Rev., 100, 748, 1956.

## EFFECT OF UNIFORM COMPRESSION ON THE OSCILLATION OF THE MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF BISMUTH AT LOW TEMPERATURES

N. B. Brandt, V. A. Ventzel

The influence of uniform pressure of about 1000 atmospheres on the oscillation of the magnetic susceptibility of bismuth in a magnetic field up to 13 kOe has been investigated at  $4.2^{\circ}$ — $1.6^{\circ}$  K. The character of variation of the effective mass tensor, Fermi boundary energy  $E_0$ , Dingle factor and electron concentration have been estimated with the Landau formula. Assumptions regarding the nature of the electron energy spectrum in bismuth are made.