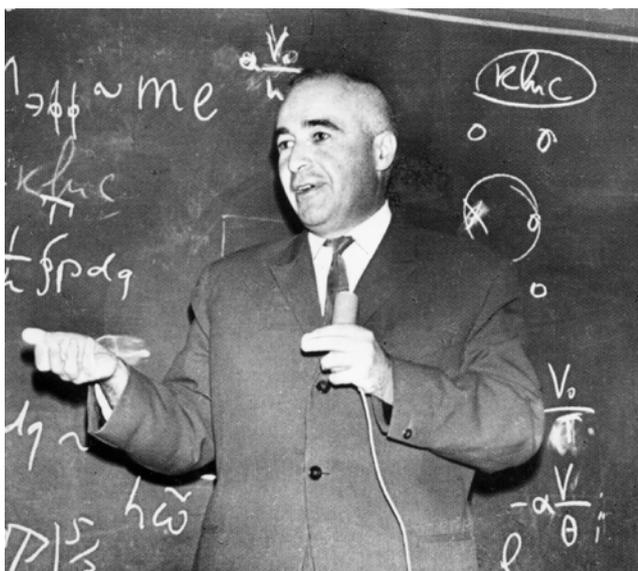
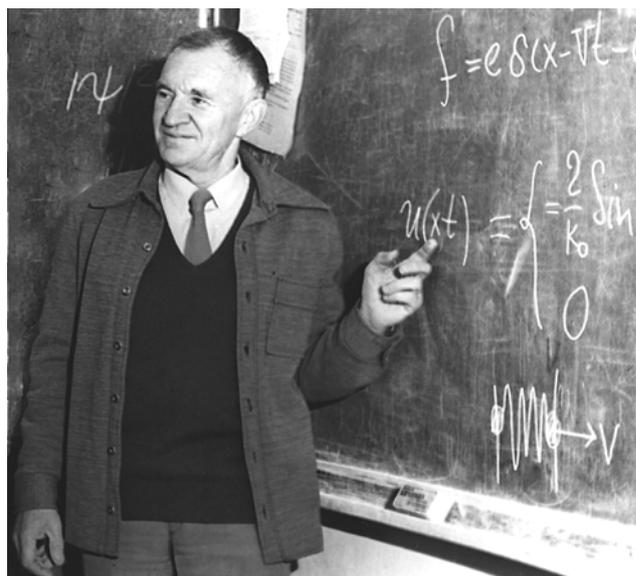


К 60-ЛЕТИЮ ТЕОРИИ ЛИФШИЦА–КОСЕВИЧА



Илья Михайлович Лифшиц, 60-е годы



Арнольд Маркович Косевич, 80-е годы

В этом году исполняется шестьдесят лет с тех пор, как в «Докладах академии наук СССР» была опубликована статья Ильи Михайловича Лифшица и Арнольда Марковича Косевича «К теории эффекта де Газа–ван Альфена для частиц с произвольным законом дисперсии» [1]. Эта работа сыграла ключевую роль в создании нового направления физики твердого тела, получившего название «фермиология» — наука о структуре поверхности Ферми (ПФ) и ее характеристиках: площадях сечений, диаметрах, эффективной и циклотронной массах, скоростях в разных точках на ПФ и др.

Осцилляционная зависимость магнитной восприимчивости металла $\chi(H)$ от величины магнитного поля H , связанная с магнитным квантованием энергии орбитального движения носителей заряда, теоретически была предсказана Ландау в работе «Диамagnetизм металлов», опубликованной в 1930 г. [2]. В том же году независимо появилось сообщение де Гааза и ван Альфена “Note on the dependence of the susceptibility of diamagnetic metal on the field” о наблюдении осцилли-

рующей с полем зависимости $\chi(H)$ в монокристаллах висмута [3]. Эффект получил название по именам авторов экспериментального открытия. К началу пятидесятых годов прошлого столетия эффект де Гааза–ван Альфена (дГВА) удалось наблюдать во многих металлах (см. монографию Шенберга [4] и цитированную в ней литературу), и в этой связи теоретическое исследование квантовых осцилляционных эффектов стало весьма актуальным.

Впервые на возможность определения экстремальных сечений ПФ по периоду осцилляций дГВА обратил внимание Онсагер в 1952 г. в работе “Interpretation of de Haas van Alphen effect” [5]. Онсагер, исходя из правила квантования Бора–Зоммерфельда, записал связь между номерами n максимумов на осцилляционной зависимости $\chi(H)$, которым соответствуют значения поля H_n , и экстремальными сечениями A ПФ плоскостями $\mathbf{p}\mathbf{H} = \text{const}$ (\mathbf{p} — импульс электрона) [5]

$$n + \Theta = (hc/e)A/H_n. \quad (1)$$

Доклады Академии Наук СССР
1954. Том ХСVI, № 5

ФИЗИКА

И. М. ЛИФШИЦ и А. М. КОСЕВИЧ

К ТЕОРИИ ЭФФЕКТА ДЕ ГАЗЗ — ВАН АЛЬФЕНА ДЛЯ ЧАСТИЦ
С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ЗАКОНОМ ДИСПЕРСИИ

(Представлено академиком Л. Д. Ландау 15 III 1954)

1. В настоящее время периодическая зависимость магнитной восприимчивости от поля при низких температурах (эффект де Гааз — ван Альфена) наблюдается для большого числа металлов ⁽¹⁾. Между тем, количественная теория этого явления разработана для случая электронного газа с квадратичным законом дисперсии, справедливым лишь у дна соответствующей энергетической зоны ⁽²⁾.

Представляется весьма существенным выяснение того, в какой мере особенности эффекта связаны с этим предположением. Некоторые качественные соображения по этому поводу были высказаны в последнее время в работе ⁽³⁾, однако примененный там путь рассуждений не позволяет провести полный анализ эффекта.

Известно, что при низких температурах электроны в металле, взаимодействующие друг с другом и с решеткой, в термодинамическом отношении могут быть заменены идеальным ферми-газом заряженных квази-частиц с некоторым законом дисперсии

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}(p_x, p_y, p_z). \quad (1)$$

Поэтому все вычисления следует произвести для идеального газа квази-частиц с общим законом дисперсии (1). При этом первая задача, которая должна быть решена, заключается в отыскании уровней энергии такой частицы в магнитном поле.

Так как в дальнейшем нас будут интересовать в основном уровни энергии, отвечающие большим квантовым числам, то квантование движения в магнитном поле достаточно произвести в квази-классическом приближении.

Гамильтониан частицы с законом дисперсии (1) в магнитном поле \mathbf{H} , направленном по оси z , формально получается заменой в (1) компонент импульса p_i , компонентами оператора кинетического импульса \check{P}_i , связанными между собой соотношениями коммутации:

$$[\check{P}_y, \check{P}_x] = \frac{e}{c} H, \quad [\check{P}_x, \check{P}_z] = [\check{P}_y, \check{P}_z] = 0. \quad (2)$$

Соотношение между \check{P}_x и \check{P}_y соответствует перестановочному соотношению между обобщенной координатой и обобщенным импульсом: $[\check{P}_y, \check{Q}_y] = 1$. Роль оператора обобщенной координаты \check{Q}_y играет оператор $\frac{c}{eH} \check{P}_x$. Поэтому можно написать условие квази-классического квантования:

$$\oint P_y dQ_y = \frac{c}{eH} \oint P_x dP_x = (n + \gamma) h; \quad 0 < \gamma < 1. \quad (3)$$

963

Первая страница основополагающей статьи И.М. Лифшица и А.М. Косевича [1].

Строгое решение задачи о зависимости магнитной восприимчивости металла от величины сильного (квантующего) магнитного поля при самых общих предположениях о законе дисперсии электронов проводимости получено Лифшицем и Косевичем [1] (более подробное изложение этих результатов было опубликовано год спустя в «Журнале экспериментальной и теоретической физики» [6]). Общая формула для осцилляций магнитной восприимчивости $\chi(H)$ известна сейчас в научной литературе как формула Лифшица–Косевича [4]. В том же томе ДАН СССР в 1954 г. появилась работа И.М. Лифшица и А.В. Погорелова [7], в которой показано, что, зная все экстремальные сечения произвольной выпуклой ПФ, можно однозначно определить ее форму. Авторы теории [1] не только строго получили связь периода по обратному полю $1/H$ осцилляций дГвА и экстремальных площадей сечений ПФ, но и определили область применимости формулы (1), а также показали, что температурная зависимость амплитуды осцилляций дает возможность определить значение циклотронной массы электрона. Формула (1), позволяющая простым образом найти площадь экстремального сечения ПФ по периоду осцилляций дГвА, широко используется исследователями и по сей день. Различные авторы называют ее по-разному — формулой Онсагера или формулой Лифшица–Онсагера.

Работа Лифшица и Косевича [1] стимулировала поток теоретических исследований различных свойств металлов для произвольного закона дисперсии носителей ряда, считая *a priori* его известным. В результате удалось создать комплекс методов определения электронного энергетического спектра металлов путем экспериментального исследования различных термодинамических и кинетических характеристик металлов и сравнения результатов эксперимента с соответствующей теорией. Достижения фермиологии к «периоду зрелости» (70-е годы XX-го века), к которому были восстановлены ПФ большинства металлических элементов, подробно отражены в книгах [8–10] и приведенной в них библиографии. Сегодня поверхностями Ферми простых металлов можно полюбоваться на сайте “The Fermi Surface Database” [11].

Однако фермиология не «стареет». Исследование многокомпонентных соединений принесло целый ряд замечательных открытий — металлическая проводимость сложных органических соединений, высокотемпературная сверхпроводимость купратов, сосуществование сверхпроводимости и магнетизма, двухзонная сверхпроводимость MgB_2 и др. И один из первых вопросов, который всегда возникал при поиске объяснения обнаруженных явлений, это вопрос о характеристиках ПФ. Расширился и арсенал методов фермиологии. Колоссальный прогресс в развитии вычислительной техники сделал доступным для широкого круга исследователей расчеты из первых принципов энергетического спектра

вырожденных проводников. Сегодня широко изучается ПФ с применением фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES, Angle-resolved photoemission spectroscopy) [12]. Прямая визуализация контуров ПФ возможна с помощью сканирующей туннельной спектроскопии поверхности образца вблизи единичных дефектов, находящихся под поверхностью [13,14].

С достижениями в исследовании энергетических спектров новых соединений с металлическим типом проводимости за последние два десятилетия можно ознакомиться, например, в обзорных статьях [15–22], хотя перечисленные публикации, безусловно, не исчерпывают всей информации, накопленной фермиологией к настоящему времени.

Представленный вниманию читателя специальный выпуск «Новые достижения фермиологии» журнала «Физика низких температур» приурочен к 60-летию появления теории Лифшица–Косевича. Илья Михайлович Лифшиц в то время руководил теоретическим отделом в «Украинском физико-техническом институте» (УФТИ) и одновременно заведовал кафедрой на физико-математическом факультете Харьковского государственного университета, а Арнольд Маркович Косевич был его аспирантом.

И.М. Лифшиц и А.М. Косевич на протяжении целого ряда лет были членами редакционной коллегии ФНТ и внесли весомый вклад в становление журнала. Одним из пионеров экспериментального исследования эффекта де Гааза–ван Альфена в металлах был основатель журнала ФНТ и его первый главный редактор Борис Иеремиевич Веркин [23]. Работы Б.Г. Лазарева, Б.И. Веркина и сотрудников, выполненные в УФТИ в 1949–1953 гг., в значительной мере стимулировали фундаментальные теоретические исследования И.М. Лифшица и его учеников в области электронной теории металлов и фермиологии.

В.Г. Песчанский
Ю.А. Колесниченко

1. И.М. Лифшиц, А.М. Косевич, *ДАН СССР* **96**, 963 (1954).
2. L.D. Landau, *Z. Phys.* **64**, 629 (1930).
3. W.J. de Haas and P.M. van Alphen, *Leiden Commun.* **208d** (1930).
4. D. Shoenberg, *Magnetic Oscillations in Metals*, Cambridge University Press (1984) [*Магнитные осцилляции в металлах*, Москва, Мир (1986)].
5. L. Onsager, *Philos. Mag.* **43**, 1006 (1952).
6. И.М. Лифшиц, А.М. Косевич, *ЖЭТФ* **29**, 730 (1955).
7. И.М. Лифшиц, А.В. Погорелов, *ДАН СССР* **96**, 1143 (1954).
8. И.М. Лифшиц, М.Я. Азбель, М.И. Каганов, *Электронная теория металлов*, Наука, Москва (1971).
9. А.А. Абрикосов, *Основы теории металлов*, Наука, Москва (1987).

10. Arthur P. Cracknell, *The Fermi Surfaces of Metals: a Description of the Fermi Surfaces of the Metallic Elements*, Taylor and Francis, London (1971).
11. T.-S. Choy, J. Naset, J. Chen, S. Hershfield, and C. Stanton, *Bull. Am. Phys. Soc.* **45**, L3642 (2000). (<http://www.phys.ufl.edu/fermisurface/>).
12. A. Damascelli, *Phys. Scripta* **T109**, 61 (2004).
13. Ye.S. Avotina, Yu.A. Kolesnichenko, A.F. Otte, and J.M. Ruitenbeek, *Phys. Rev. B* **74**, 085411 (2006).
14. A. Weismann, M. Wenderoth, S. Lounis, P. Zahn, N. Quaas, R.G. Ulbrich, P.H. Dederichs, and S. Blügel, *Science* **323**, 1190 (2009).
15. J. Wosnitza, *Fermi Surface of Low-Dimensional Organic Metals and Superconductors*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (1996).
16. M.I. Kaganov and V.G. Peschansky, *Phys. Rep.* **372**, 445 (2002).
17. A. Damasceli, Z. Hussain, and Zhi-Xun Shen, *Rev. Mod. Phys.* **75**, 473 (2003).
18. М.В. Карцовник, В.Г. Песчанский, *ФНТ* **31**, 249 (2005) [*Low Temp. Phys.* **31**, 185 (2005)].
19. S. Uji and J.S. Brooks, *The Physics of Organic Superconductors and Conductors*, Springer Ser. Mater. Science **110**, 89 (2008).
20. G. Kontrym-Sznajd, *ФНТ* **35**, 765 (2009) [*Low Temp. Phys.* **35**, 599 (2009)].
21. A Carrington, *Rep. Prog. Phys.* **74**, 124507 (2011).
22. A.A. Kordyuk, *ФНТ* **38**, 1119 (2012) [*Low Temp. Phys.* **38**, 889 (2012)].
23. «Б.И. Веркин, каким мы его помним», Наукова думка, Киев (2007).