

Памяти Виталия Лазаревича Гинзбурга

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

О Гинзбурге – Ландау и немного о других

Е.Г. Максимов

В заметке даётся краткий исторический очерк создания теории Гинзбурга – Ландау. Подробно обсуждаются ранние публикации по макроскопической теории сверхпроводимости. Освещаются дискуссии между двумя соавторами и их окружением. Обсуждается также обзор В.Л. Гинзбурга 1952 г., содержащий чётко сформулированные положения, которым должна удовлетворять микроскопическая теория сверхпроводимости (в то время ещё не созданная) и которые Дж. Бардин назвал "моделью Гинзбурга с энергетической целью".

PACS numbers: 01.65. + g, 74.20. – z, 74.25. – q

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201011f.1231

В этой заметке я хочу рассказать о моих исторических (конечно, не в смысле их значимости) изысканиях, касающихся некоторых статей В.Л. Гинзбурга по физике сверхпроводимости, которые были опубликованы в 1950-е годы. В основном речь будет идти о работах, связанных с созданием макроскопической теории сверхпроводимости. Появление подобной заметки в специальном выпуске журнала *Успехи физических наук*, посвящённом памяти Виталия Лазаревича, возможно, выглядит несколько странно. Казалось бы, что может быть интересного сегодня в работах, опубликованных более 50 лет назад? Научные результаты, полученные в них, давно и хорошо известны. Я не собираюсь поэтому детально останавливаться на чисто научных вопросах, освещённых во многих монографиях и обзорах, а лишь попытаюсь кратко осветить роль В.Л. в истории создания макроскопической теории сверхпроводимости (в дальнейшем я часто буду использовать сокращение В.Л., поскольку мы, сотрудники Виталия Лазаревича, обычно именно так называли его между собой). Здесь мне хотелось бы напомнить о серьёзных дискуссиях между авторами макроскопической теории, оказавших влияние на её становление и развитие, а также коснуться в этой связи некоторых аспектов психологии научного творчества. В процессе моих "исторических изысканий" я обратил внимание на то, что основополагающие статьи по макроскопической теории (как и неопубликованные воспоминания участников и свидетелей событий) содержат интересную "информацию к размышлению" не только о чисто научных проблемах, но и об авторах этих статей и о времени, в котором они жили.

Начну я, естественно, с работы В.Л. Гинзбурга и Л.Д. Ландау [1], появившейся в 1950 г., за которую, в частности, В.Л. в 2003 г. получил Нобелевскую премию по физике. Работа [1] более чем заслуженно удостоена Нобелевской премии — её влияние вышло далеко за рамки теории сверхпроводимости, которой она посвящена. Сформулированные в ней идеи работают и поныне во многих областях физики, химии и даже математики. Помимо работы [1], я буду опираться на опубликованные вскоре после неё два обзора В.Л. [2, 3] и статью А.А. Абрикосова [4], также принёсшую её автору Нобелевскую премию. Кроме того, я кратко упомяну и некоторые другие работы, выполненные в те же 1950-е годы.

Итак, Гинзбург и Ландау в работе [1], применив созданную ранее Львом Давидовичем теорию фазовых переходов 2-го рода, написали выражение для свободной энергии сверхпроводника и получили из него уравнение для некоторой волновой функции Ψ , квадрат модуля которой $|\Psi|^2$ рассматривался как плотность сверхпроводящих электронов. Это уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{1}{2m^*} \left(-i\hbar\nabla - \frac{e^*}{c} \mathbf{A} \right)^2 \Psi + \alpha\Psi + \beta\Psi|\Psi|^2 = 0. \quad (1)$$

Граничное условие к уравнению (1) записывается как

$$\left(-i\hbar\nabla - \frac{e^*}{c} \mathbf{A} \right) \mathbf{n} = 0. \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{n}$ — единичный вектор, нормальный к поверхности сверхпроводника, $\mathbf{A}$ — векторный потенциал, описывающий существующее в системе магнитное поле, $\hbar$ — постоянная Планка, c — скорость света, α и β — коэффициенты в разложении свободной энергии вблизи точки фазового перехода по параметру порядка $|\Psi|^2$. При этом коэффициент α равен $\alpha_0(T - T_c)$, где T_c — температура сверхпроводящего перехода. Помимо уравнения для функции Ψ , в работе [1] были получены также уравнение для векторного потенциала и выражение для

Е.Г. Максимов. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация
Тел./Факс (499) 135-85-33
E-mail: maksimov@lpi.ru

Статья поступила 22 сентября 2010 г.,
после доработки 14 октября 2010 г.

сверхпроводящего тока $\mathbf{j}$:

$$\Delta \mathbf{A} = -\frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \quad (3)$$

$$\mathbf{j} = -\frac{ie^*\hbar}{2m^*} (\Psi^* \nabla \Psi - \Psi \nabla \Psi^*) - \frac{e^{*2}}{m^*c} |\Psi|^2 \mathbf{A}. \quad (4)$$

Уравнение Гинзбурга–Ландау является в некотором смысле стандартным квантово-механическим нелинейным уравнением Шрёдингера для системы заряженных частиц с зарядом e^* и массой m^* . Вопрос о величине и физическом смысле этих параметров обсуждается ниже, а здесь мы ограничимся цитатой из работы [1]: "нет оснований считать их отличными от заряда и массы электрона (e, m)". Следует отметить, что использование в построении феноменологической теории сверхпроводимости квантово-механического уравнения (1) и квантово-механического выражения (3) для тока — очень нетривиальный шаг. Для многих физиков к 1950 г. было ясно, что сверхпроводимость, безусловно, связана с квантовой природой металлического состояния, но впервые эта связь была чётко и ясно выражена именно в статье [1]. На основе уравнений (1) и (3) можно рассмотреть сверхпроводник, помещённый во внешнее магнитное поле H_0 . Если при этом считать, что волновая функция Ψ сверхпроводника в магнитном поле не меняется, мы получим из уравнения (4) следующее выражение для тока:

$$\mathbf{j} = -\frac{e^2 N_s}{mc} \mathbf{A} = -\frac{c}{4\pi\lambda^2} \mathbf{A}, \quad (5)$$

где $N_s = |\Psi_0|^2$ и

$$\lambda^2 = \frac{mc^2}{4\pi N_s e^2}. \quad (6)$$

Уравнение (5) в точности совпадает с уравнением, описывающим идеальный диамагнетизм сверхпроводников. Это уравнение было предложено ещё в 1930-е гг. английскими учёными — братьями Лондонами на чисто интуитивной основе. Решая уравнения (3) и (5) для системы, помещённой во внешнее магнитное поле, можно описать поведение сверхпроводника в этом поле. Как показали братья Лондоны, внешнее поле выталкивается из объёма сверхпроводника и экспоненциально затухает в глубину от поверхности на расстояниях порядка глубины проникновения λ , определяемой соотношением (6).

В рамках уравнения Гинзбурга–Ландау можно самосогласованно решить уравнения для векторного потенциала $\mathbf{A}$ и волновой функции Ψ . В работе [1] было показано, что число сверхпроводящих электронов, в свою очередь, обращается в нуль на поверхности и экспоненциально быстро достигает равновесного значения в объёме образца на расстояниях порядка $\sqrt{2}\xi$, где

$$\xi^2 = \frac{\hbar^2}{2m|\kappa|}. \quad (7)$$

Был введён также очень существенный для задачи параметр κ , равный отношению глубины проникновения λ к длине когерентности ξ :

$$\kappa = \frac{\lambda}{\xi}. \quad (8)$$

Из формул (6)–(8) ясно, что при $\kappa = 1/\sqrt{2}$ характерные расстояния, на которых происходят изменения магнитного поля H и сверхпроводящего параметра порядка $|\Psi(r)|^2$, становятся равными. Из текста статьи [1] следует, что авторы прекрасно понимали, что значение параметра $\kappa = 1/\sqrt{2}$ является в некотором смысле критическим и свойства сверхпроводников с $\kappa < 1/\sqrt{2}$ и $\kappa > 1/\sqrt{2}$ могут сильно отличаться друг от друга, особенно во внешних магнитных полях.

Хорошо известно, что при некотором значении магнитного поля H_{K1} однородное сверхпроводящее состояние разрушается и металл переходит в нормальное состояние. В работе [1] было исследовано, в частности, поведение металла вблизи этого критического поля. Было вычислено значение магнитного поля H_{K2} , при котором в металле может возникнуть зародыш сверхпроводящего состояния:

$$H_{K2} = H_{K1}\kappa\sqrt{2}. \quad (9)$$

В соответствии с формулой (9), в сверхпроводниках с $\kappa \geq 1/\sqrt{2}$ могут возникать зародыши сверхпроводящей фазы при магнитных полях, превышающих H_{K1} . Это означает, что сверхпроводимость в каком-то неоднородном состоянии могла бы существовать и при магнитных полях $H > H_{K1}$.

Далее в тексте статьи [1] видны следы борьбы двух соавторов по вопросу, что же им делать с системами, в которых $\kappa \geq 1/\sqrt{2}$. Позволю себе привести цитату из работы [1]: "Поскольку из экспериментальных данных следует, что κ много меньше единицы, решение наших уравнений, возможное в пределе κ , стремящемся к бесконечности, не представляет, по существу, интереса, и мы его приводить не будем". Мне же из бесед с одним из соавторов точно известно, чья именно рука вписала в машинописный текст эту фразу, вычеркнув что-то, находившееся на этом месте ранее. Правда, в ходе бесед мне так и не удалось установить, что же было напечатано на машинке на этом месте. Мой собеседник, обычно словоохотливый, ответил лишь, что он не помнит. Хорошо зная своего собеседника, в том числе по нашим совместным, хотя и немногочисленным, публикациям, я могу себе представить, насколько трудно было убедить его выбросить какую-то интересную, по его мнению, деталь из сделанной им работы.

Видимо, поэтому вскоре после приведённой цитаты в статье [1] опять обсуждается вопрос о величине κ : "Заметим теперь, что при $\kappa \geq 1/\sqrt{2}$ возникает своеобразная неустойчивость нормальной фазы металла. ... Можно видеть, что при $\kappa \geq 1/\sqrt{2}$ появляется возможность образования прослоек сверхпроводящей фазы в том смысле, что появляются решения наших уравнений с неравным нулю параметром порядка Ψ Эта неустойчивость связана с тем, что при $\kappa \geq 1/\sqrt{2}$ поверхностная энергия между нормальной и сверхпроводящей фазами является отрицательной". Более того, в том же абзаце работы [1], из которого взята эта цитата, записано уравнение Гинзбурга–Ландау для функции Ψ , описывающей сверхпроводящий зародыш, в предположении, что в поле $H > H_{K1}$ существует однородное нормальное состояние. Для знатоков я приведу это уравнение, поскольку оно понадобится нам ниже:

$$\frac{d^2\Psi}{dz^2} = -\kappa^2 \left(1 - \frac{H}{H_{K1}} z^2 \right) \Psi. \quad (10)$$

Это хорошо известное в квантовой механике уравнение гармонического осциллятора. До решения этого уравнения дело, однако, не доходит, поскольку второй соавтор тоже не дремлет, и в статье появляется следующее утверждение: *"Вопрос о характере состояния, возникающего при $\kappa \geq 1/\sqrt{2}$, не исследовался, так как в этом пока нет необходимости, поскольку из опытных данных ... следует, что κ много меньше единицы"*. В обзоре В.Л. [2], опубликованном в том же 1950 г. в двух выпусках журнала *УФН*, вновь ставится вопрос о величине κ и о возможности существования в сверхпроводниках с $\kappa \geq 1/\sqrt{2}$ неоднородных сверхпроводящих состояний в магнитных полях $H > H_{к1}$. Приведу теперь цитату из обзора [2]: *"Как показывает исследование исходных уравнений, при $\kappa \geq 1/\sqrt{2}$ возникает своеобразная неустойчивость нормальной фазы металла"*. В.Л. возвращается к этому вопросу и в обзоре [3]: *"При отрицательных значениях поверхностной энергии разрушение сверхпроводимости массивного образца при $H = H_{к1}$ не имело бы места, вместо этого образец распадался бы на чередующиеся сверхпроводящие и нормальные слои"*.

Вот такие баталии разворачивались вокруг проблемы, решение которой было впоследствии опубликовано Абрикосовым в его знаменитой работе [4]. Хочу сразу же отметить, что формула (10) фактически является стартовой в статье [4]. Существенно при этом, что в [4] вычислялось не появление сверхпроводящего зародыша на фоне однородного нормального состояния, а наоборот — появление зародыша нормальной фазы на фоне однородного сверхпроводящего состояния. В работе [4] Абрикосов показал, что в сверхпроводниках с $\kappa > 1/\sqrt{2}$, которые в наше время называются сверхпроводниками II рода, в магнитных полях $H > H_{к1}$ проникновение поля в образец происходит в виде специфических вихрей, сердцевина которых находится в нормальном состоянии, при этом магнитное поле в вихрях поддерживается кольцевыми токами.

Понять причину нежелания Л.Д. Ландау разбираться с проблемой сверхпроводников с $\kappa > 1/\sqrt{2}$ сейчас уже непросто. Однако это, несомненно, представляет значительный интерес для истории физики, особенно учитывая, что именно за решение проблемы сверхпроводников с $\kappa > 1/\sqrt{2}$ Абрикосову была присуждена Нобелевская премия. На мой взгляд, в нежелании Ландау интересоваться всерьёз случаем $\kappa > 1/\sqrt{2}$ сказывалась, прежде всего, хорошо известная нелюбовь Льва Давидовича к решению абстрактных задач. Он часто повторял, что человеческая жизнь конечна, всех задач не перерешать, и нужно отбирать те, что важны для реального мира. Большинство же имевшихся к тому времени экспериментальных данных показывало, что, скорее всего, $\kappa < 1/\sqrt{2}$. К тому же было известно, что и в сверхпроводниках с $\kappa < 1/\sqrt{2}$ возможно состояние, в котором происходит расслоение на чередующиеся области сверхпроводящих и нормальных фаз. Это так называемое промежуточное состояние, возникающее, например, в шаре, помещённом в однородное магнитное поле.

Л.Д. Ландау внёс большой вклад в решение проблемы промежуточного состояния ещё в 1937 г., задолго до создания макроскопической теории сверхпроводимости. Напомним также, что Ландау ко времени написания работы [1] предложил ещё более изощрённый вариант промежуточного состояния с множественным разветвлением сверхпроводящих и нормальных фаз, поэтому

гипотеза о ещё одном неоднородном сверхпроводящем состоянии могла показаться ему несколько излишней. Кроме того, было ясно, что в сверхпроводниках с $\kappa > 1/\sqrt{2}$ не может существовать промежуточное состояние в том виде, как это было предложено Ландау и как наблюдалось в экспериментах. На это обстоятельство, как на возможную причину отсутствия интереса Ландау к системам с $\kappa > 1/\sqrt{2}$, указывает и Абрикосов в своей Нобелевской лекции [5]. Приведу цитату из этой лекции: *"Было установлено, что с увеличением параметра κ поверхностная энергия может стать отрицательной, и поскольку это противоречило бы существованию промежуточного состояния, такой случай не рассматривался"*. Во всяком случае, как мне кажется, Лев Давидович надолго отбил у В.Л. желание интересоваться сверхпроводниками с $\kappa > 1/\sqrt{2}$. Следует, конечно, отметить, что у В.Л. в те годы было в избытке проблем, которыми он с большим интересом и эффективностью занимался, включая закрытую от взглядов непосвящённых работу над термоядом, но какой-то осадок, по-видимому, остался. Не зря же В.Л. в своей статье "Сверхпроводимость и сверхтекучесть (что удалось и чего не удалось сделать)", опубликованной сперва в [6, 7] и упомянутой в [8], а затем опубликованной в расширенном варианте в книге [9], пишет с некоторой горечью: *"Таким образом, возможность существования сверхпроводников II рода мы с Ландау, фактически, просмотрели"*. По чьей вине случился недосмотр, теперь уже поздно судить. Главное, что все три участника этих перипетий стали нобелевскими лауреатами.



Нобелевские лауреаты 2003 г. В.Л. Гинзбург (слева) и А.А. Абрикосов (справа) посещают Отделение физики твёрдого тела Королевского технологического института (ОФТТ КТИ) Швеции. В центре А.М. Гришин — руководитель ОФТТ КТИ (12 декабря 2003 г., Стокгольм, Швеция).

Как долго продолжалась "нелюбовь" Ландау к сверхпроводникам с $\kappa > 1/\sqrt{2}$? Если судить по неоднократным утверждениям Алексея Алексеевича Абрикосова, и которые он повторил в своей Нобелевской лекции, то вплоть до 1955 г. Согласно Абрикосову, работу о вихрях он сделал ещё в 1952 г., но Ландау запретил ему её публиковать. Абрикосов говорит также, что Ландау разрешил ему опубликовать эту работу лишь после появления статьи Фейнмана [10] о вихрях в сверхтекучем гелии. С резким опровержением утверждений Абрикосова выступил Е.М. Лифшиц, который заявил, что

Л.Д. Ландау в принципе никому и никогда не запрещал что-либо публиковать. Мне лично трудно судить, запрещал ли Ландау кому-либо печатать даже неразумные по его мнению работы, но я знаю случаи, когда работы были опубликованы несмотря на отрицательное мнение Ландау. Об одном таком случае будет сказано ниже. Итак, в 1950 г., во время написания совместно с Гинзбургом работы [1], Ландау с большим пессимизмом смотрел на возможность существования сверхпроводников с $\kappa > 1/\sqrt{2}$. Возникает вопрос, имеются ли какие-нибудь, хотя бы косвенные, свидетельства об отношении Ландау к системам с $\kappa > 1/\sqrt{2}$ в период между 1950 и 1955 гг.? Да, такие свидетельства есть, и при этом не косвенные, а вполне прямые. Прочитую фразу из обзора В.Л. [3], опубликованного в УФН в 1952 г. *"По мысли Л.Д. Ландау, развиваемой А.А. Абрикосовым, значение $\kappa > 1/\sqrt{2}$ реализуется в сплавах, поведение которых, как хорошо известно¹, отличается от поведения "идеальных" сверхпроводников"*. Ещё более убедительно свидетельствует о позиции Ландау по данному вопросу публикация в 1952 г. в журнале *Доклады АН СССР* двух статей по обсуждаемой теме. Эти работы Абрикосова [12] и Заварицкого [13] были представлены для публикации в ДАН не кем иным, как академиком Л.Д. Ландау.

В экспериментах Н.В. Заварицкого [13] на свежесозданных (т.е. сильно разупорядоченных) сверхпроводящих плёнках таллия было обнаружено явление, которое не укладывалось в рамки теории Гинзбурга–Ландау с $\kappa < 1/\sqrt{2}$. Согласно этой теории, разрушение сверхпроводимости в сильных магнитных полях должно происходить скачком при достижении первого критического поля H_{K1} , т.е. фазовым переходом 1-го рода, и лишь в очень тонких плёнках возможен переход 2-го рода. Однако Заварицкий наблюдал в [13] фазовый переход 2-го рода на толстых сверхпроводящих плёнках Тl. Абрикосов же показал [12], что такой переход действительно может реализоваться в системах с $\kappa > 1/\sqrt{2}$. Никаких идей о магнитной структуре этих сверхпроводников в полях $H > H_{K1}$ или о существовании в них вихрей в этой работе высказано не было. Более того, я спрашивал у некоторых людей, часто общавшихся с Абрикосовым в начале 1950-х гг., что им известно по этому поводу, и собеседники мои отвечали, что ни о каких вихрях они от него в те годы не слышали.

Это значит, что ещё в 1952 г. Ландау не только не игнорировал возможность существования сверхпроводников с $\kappa > 1/\sqrt{2}$, но и понимал, что они могут существовать в сплавах и грязных металлах, и всячески поддерживал работу по их изучению. Однако представил Алексей Алексеевич Льву Давидовичу в 1952 г. ещё одну работу по свойствам сверхпроводников с $\kappa > 1/\sqrt{2}$ и именно по вихрям в сверхпроводниках II рода или что-то другое; запретил Ландау Абрикосову опубликовать эту работу или нет — этого мы, по-видимому, уже никогда не узнаем.

При внимательном сравнении текстов статей [3], [4] и [12] возникает ещё один интересный, можно даже сказать, политический, вопрос. Как мы видели, в обзоре В.Л. 1952 г. [3] недвусмысленно сказано, что Ландау уже в

1952 г. понимал, что условие $\kappa > 1/\sqrt{2}$ может выполняться именно в сплавах. Никаких упоминаний о сплавах в статье Абрикосова 1952 г. [12] нет. И только в работе 1957 г. [4] в подстрочном примечании Алексей Алексеевич указывает, что идея о возможной реализации значений $\kappa > 1/\sqrt{2}$ в сплавах была впервые высказана Л.Д. Ландау. Непонятно, высказал ли Ландау идею о выполнении условия $\kappa > 1/\sqrt{2}$ в сплавах только Гинзбургу в 1952 г., утаив её от Абрикосова, или просто посоветовал Алексею Алексеевичу не упоминать в статье [12] о сплавах. Возможно, был какой-то криминал в этой идее в 1952 г., который потерял свою актуальность к 1957 г.? Вообще говоря, был. В статье Абрикосова 1957 г. [4] проводится детальное сравнение теоретических расчётов свойств сверхпроводников II рода с экспериментальными данными, полученными ещё в 1937 г. харьковской группой под руководством Л.В. Шубникова [14]. В 1952 г. такое сравнение могло пройти не столь безболезненно как в 1957 г., поскольку в 1937 г. Л.В. Шубников был расстрелян как враг народа. Лев Давидович в то время работал в Харькове и не мог не знать об этой работе Шубникова, но, по свидетельству В.Л., не уделил ей особого внимания во время их совместной работы над статьёй [1]. Однако после работы Заварицкого [13], в которой были получены очень похожие результаты на плёнках таллия, он ясно осознал суть работы Шубникова [14]. Популяризировал ли он среди своего окружения эту работу до 1954 г. — неизвестно. "Вот такие были времена".

Вообще говоря, сегодня не так уж важно, запрещал Ландау Абрикосову печатать статью о вихрях или нет. Даже будучи опубликованной после работы Фейнмана о вихрях в сверхтекучем гелии, работа Абрикосова безусловно заслуженно удостоена Нобелевской премии, поскольку она заложила теоретические основы физики сверхпроводников II рода, широко используемых ныне в науке и технике. Конечно, публикация работы о вихрях до Фейнмана может быть предметом большой личной гордости, хотя, как известно, сам Фейнман получил Нобелевскую премию не за вихри в жидком гелии, а за работы по квантовой электродинамике.

Была ещё одна проблема, при рассмотрении которой мнения авторов работы [1] серьёзно разошлись. Это уже упоминавшийся вопрос о величине эффективного заряда e^* . В процессе анализа имевшихся в то время экспериментальных данных и сравнения их с результатами расчётов, полученными с помощью уравнений Гинзбурга–Ландау, В.Л. обнаружил, что эти данные гораздо лучше согласуются с теорией, если взять для e^* не заряд электрона, а несколько большую величину. Насколько мне известно, эта попытка была в корне пресечена Ландау без каких-либо серьёзных аргументов. Но, как уже было сказано, не так-то просто заставить В.Л. забыть то, что он придумал, и в дальнейшем он неоднократно возвращался к этой проблеме.

В обзоре [3] В.Л. также коснулся вопроса о величине e^* и указал, что его можно прояснить путём сравнения теории с опытом. Прочитую: *"Вопрос о зависимости глубины проникновения магнитного поля в массивный металл от силы поля нуждается, очевидно, в дальнейшем исследовании. Работа в этом направлении особенно важна потому, что из соответствующих данных можно определить величину κ и сравнить её с теоретическим значением. При этом не нужно забывать, что в соответ-*

¹ Здесь у В.Л. стоит ссылка на его книгу *Сверхпроводимость*, опубликованную в 1946 г. [11] (историю создания этой книги см. в [7, с. 430]!

ствующих формулах переход к численному коэффициенту совершён в предположении, что фигурирующий в теории заряд равен заряду свободного электрона. Это предположение в рамках теории [1] представляется естественным, и против него не видно никаких возражений. Тем не менее, подобное предположение не кажется нам совершенно обязательным. Если бы формула с $e = 4,8 \times 10^{-10}$ оказалась не согласующейся с данными о глубине проникновения в сильном поле (как сказано, для такого утверждения оснований пока ещё нет), то из измерений нужно определить входящий в теорию параметр λ , а проверка теории состояла бы в измерении поверхностной энергии, которая определяется тем же параметром".

Эту свою программу В.Л. выполнил — результаты опубликованы в статье [15]. На основе анализа экспериментальных данных по глубине проникновения магнитного поля в сверхпроводник он пришел к выводу, что согласие результатов расчётов, проведённых в рамках теории Гинзбурга–Ландау, с экспериментальными данными оказывается лучше, если считать, что эффективный заряд e^* не равен заряду электрона, а в 2–3 раза больше него. В книге [9, с. 57] утверждается, что при обсуждении работы [15] Ландау высказал существенное возражение против возможности введения эффективного заряда. Там же [9, с. 57] сказано: "возражений на это замечание я не нашёл и лишь с его согласия привёл его мнение в статье [15]". Возражение Ландау было достаточно серьёзным, и связано оно было с тем, что вводимый при этом эффективный заряд e^* мог бы зависеть от состава вещества, от температуры и т.п., а значит, мог бы оказаться функцией координат. При этом возможно нарушение градиентной инвариантности теории, что недопустимо. Результаты анализа экспериментальных данных также казались В.Л. серьёзным делом. Как мы видим, даже серьёзное возражение Ландау отнюдь не остановило Гинзбурга от публикации его работы и никаких запретов или оргвыводов со стороны Ландау не последовало, хотя авторитета у Льва Давидовича в редакции ЖЭТФ было достаточно, чтобы остановить практически любую публикацию.

Вопрос об эффективном заряде, казалось бы, разрешился с созданием Бардином, Купером и Шриффером (БКШ) микроскопической теории сверхпроводимости и выполненным Л.П. Горьковым выводом [16] уравнений Гинзбурга–Ландау на основе этой теории. В работе Горькова было показано, что функция Ψ , входящая в уравнения Гинзбурга–Ландау, является волновой функцией сверхпроводящих электронных пар и, соответственно, эффективный заряд в уравнениях равен удвоенному заряду электрона, т.е. $e^* = 2e$. Казалось бы, что предсказание В.Л. полностью подтвердилось и не возникает никакого противоречия с градиентной инвариантностью. В действительности, все обстоит несколько сложнее. В.Л. получил значение e^* из анализа экспериментальных данных по глубине проникновения магнитного поля λ . Выражение (6) для этой величины приведено выше, но мы перепишем его ещё раз несколько по-другому:

$$\lambda^2 = \frac{m^* c^2}{4\pi |\Psi_0|^2 e^{*2}}. \quad (11)$$

Из работы Горькова следует, что не только $e^* = 2e$, но и $m^* = 2m$. Кроме того, следует учесть ещё одно обстоя-



В Иллинойском университете (Урбана-Шампейн, 1987 г.) слева направо: Е.Г. Максимов, Дж. Бардин, В.Л. Гинзбург и Д. Пайнс.

тельство, недостаточно ясно подчеркнутое в работе Горькова, а именно то, что эту волновую функцию надо нормировать не на число сверхпроводящих электронов, а на число сверхпроводящих пар, т.е. $|\Psi_0|^2 = N_s/2$. Если мы теперь подставим эти величины в формулу (11), то убедимся, что значение λ остаётся таким же, как и в случае $e^* = e$, $m^* = m$ и $|\Psi_0|^2 = N_s$. В этом смысле диамагнитные свойства сверхпроводников в рамках уравнения Гинзбурга–Ландау правильно описываются и значениями параметров e^* , m^* и N_s , введёнными в работе [1].

Таким образом, подтверждение своей догадки о том, что $e^* \neq e$, В.Л. получил, к сожалению, по причине неточности экспериментальных данных. Спрашивается, существуют ли экспериментальные данные, которые напрямую подтверждают, что носителями заряда в сверхпроводниках являются не электроны, а электронные пары с удвоенным зарядом? Такие данные есть. Это, прежде всего, квантование магнитного потока. Существование этого эффекта было впервые предсказано Ф. Лондоном в конце 40-х годов XX столетия.

Для понимания сущности этого эффекта рассмотрим массивный сверхпроводник с цилиндрической полостью внутри него. Пусть сначала температура T выше критической. Наложим внешнее магнитное поле, параллельное образующей цилиндрической полости, а затем понизим температуру, чтобы образец перешёл в сверхпроводящее состояние. Теперь поле будет вытолкнуто из объёма сверхпроводника, а в полости останется некоторый замороженный магнитный поток $\Phi = HS$, где H — магнитное поле, S — площадь сечения цилиндра. Поток этот будет поддерживаться токами, протекающими по сверхпроводнику вблизи стенок цилиндрической полости. Рассмотрим некоторый контур C внутри образца, отстоящий от стенок значительно дальше глубины проникновения магнитного поля. Ясно, что сверхпроводящий ток на этом контуре равен нулю. Учтём также, что модуль волновой функции сверхпроводящих электронов постоянен на этом контуре, а меняться может лишь фаза $\theta(r)$ волновой функции $\Psi_0 \exp[i\theta(r)]$. Тогда, воспользовавшись выражением (4) для тока, можно написать

$$\mathbf{j} = \frac{e^{*2} \Psi_0^2}{mc} \left[\frac{\hbar c}{e^*} \nabla \theta(r) - \mathbf{A} \right] = 0. \quad (12)$$

В этом уравнении для нас представляет интерес лишь выражение

$$\frac{\Phi_0}{2\pi} \nabla\theta(r) - A = 0. \quad (13)$$

Здесь Φ_0 — элементарный квант магнитного потока

$$\Phi_0 = \frac{2\pi\hbar c}{e^*}. \quad (14)$$

Проинтегрировав теперь уравнение (13) по контуру C и учитывая, что

$$\oint_C A dl = \Phi \quad (15)$$

и что из-за однозначности волновой функции при интегрировании по замкнутому контуру

$$\oint_C \nabla\theta(r) dl = 2\pi n, \quad (16)$$

где n — целое число, мы окончательно получаем $\Phi = n\Phi_0$. Это означает, что замороженный поток в полости внутри сверхпроводника квантуется и его квант равен Φ_0 . Приведённый здесь вывод с помощью уравнения Гинзбурга–Ландау фактически взят из работы Гинзбурга [17].

Ф. Лондон, впервые указавший на существование квантования магнитного потока, получил для кванта потока величину $\Phi_0 = 2\pi\hbar c/e$, что соответствует значению эффективного заряда в $e^* = e$ (14). Экспериментально квантование потока было обнаружено лишь в 1961 г. Было показано, что наблюдаемый квант потока в два раза меньше, чем предложенный Лондоном. Этот ответ получается автоматически, если учесть в (14), что $e^* = 2e$. Заметим, что в книге Шриффера *Теория сверхпроводимости* в параграфе, посвящённом квантованию магнитного потока, с большим уважением упоминается идея В.Л. о том, что заряд сверхтекучей электронной компоненты должен быть порядка 2–3 зарядов электрона. Справедливости ради, следует отметить, что теоретическое объяснение величины экспериментально измеренного кванта магнитного потока было опубликовано Янгом, Онзагером и Бардином в 1961 г. в том же номере журнала *Physical Review Letters*, что и две экспериментальные работы. В своих теоретических выводах указанные авторы исходили из идеи существования в сверхпроводниках электронных пар. Таким образом, диамагнитные свойства сверхпроводников правильно описываются уравнением Гинзбурга–Ландау и при стандартном выборе значений заряда, массы и нормировки волновой функции, но это не всегда верно при расчёте других свойств, не связанных напрямую с диамагнетизмом, в чём мы убедились на примере кванта магнитного потока.

Вихри, существующие в сверхпроводниках II рода, как мы отмечали выше, также несут в себе магнитный поток. При расчёте величины магнитного потока, переносимого одним вихрем, также необходимо учитывать, что $e^* = 2e$. Некоторая неточность в этом отношении содержится, например, даже в Нобелевской лекции Абрикосова, где приводится правильное выражение для кванта магнитного потока $\Phi_0 = \pi\hbar c/e$, т.е. учитывается удвоенный эффективный заряд $e^* = 2e$ в уравнении Гинзбурга–Ландау, но при этом вывод правильной

величины кванта приписывается Лондону. В работе [4] Абрикосов использовал стандартное уравнение Гинзбурга–Ландау и получил верное решение для вихревой структуры, однако величина потока, переносимого вихрем, в [4] не вычислялась. Чтобы правильно вычислить квант потока, надо было бы ввести удвоенный заряд, но прямые упоминания об этом в Нобелевской лекции Абрикосова отсутствуют.

В заключение мне хочется вернуться к обзору В.Л. [3], который посвящён, в основном, обсуждению существовавших к 1952 г. микроскопических теорий сверхпроводимости (точнее говоря, не столько рассмотрению, сколько довольно резкой и нелицеприятной критике этих теорий). Микроскопическая теория сверхпроводимости вообще оказалась крепким орешком, который пришёлся не по зубам многим выдающимся физикам XX столетия. Среди них, например, Эйнштейн, Бор, Гейзенберг, Ландау, Борн и целый ряд других, не столь великих, но также широко известных учёных.

Для иллюстрации критических высказываний В.Л., содержащихся в обзоре [3], приведу фразу из его заключительной части: *"Все предпринятые в последние годы попытки построения микроскопической теории сверхпроводимости (работы Гейзенберга и Коппе, Борна и Шенга, Бардина, Фрёлиха, Тиссы и Люттингера, Мёглиха и Ромпе и др.) являются, по нашему мнению, либо ошибочными, либо лишены позитивных моментов. Объясняется это различными причинами: принятием гипотезы спонтанных токов, использованием теории возмущений за пределами её применимости и игнорированием всей совокупности имеющихся экспериментальных фактов, а также глубокой аналогии между сверхпроводимостью и сверхтекучестью"*.

Наиболее резкое критическое отношение В.Л. вызывает гипотеза о существовании в сверхпроводниках спонтанных токов даже в отсутствие внешних магнитных полей. Напомним, что одним из основоположников этой гипотезы был Л.Д. Ландау, опубликовавший соответствующую работу в 1933 г. По-видимому, к началу 1950-х гг., когда был опубликован обзор [3], Лев Давидович и сам осознал ошибочность этой гипотезы, иначе трудно объяснить столь негативную её оценку со стороны В.Л. Возможно, неслучайно эта работа отсутствует в сборнике трудов Л.Д. Ландау, вышедшем в конце прошлого столетия. В обзоре [3], естественно, имеется ссылка на работу Ландау 1933 г., однако, как следует из вышеприведённой цитаты, критика В.Л. направлена, в основном, против работ, опубликованных в конце 1940-х — начале 1950-х гг. Среди авторов этих работ два будущих нобелевских лауреата Гейзенберг и Борн, а также один будущий дважды нобелевский лауреат Д. Бардин.

В частности, В.Л. показал [3], что в серии работ Бардина, вместо создания теории сверхпроводимости, фактически была предпринята попытка создания теории металлов с сильным, но не идеальным диамагнетизмом, которым в реальности обладают сверхпроводники. Тем не менее, работа В.Л. [3] привлекла пристальное внимание Бардина. В своём обзоре [18], появившемся незадолго до знаменитой публикации по теории сверхпроводимости БКШ, он довольно подробно и уважительно обсуждает статью В.Л. [3]. Что же привлекло Бардина в этой статье? Вряд ли критика работ Гейзенберга и Борна или, тем более, критика его собственных результатов.

Бардина привлекли, надо полагать, чётко сформулированные требования, которым должна удовлетворять будущая, ещё не существовавшая в то время микроскопическая теория сверхпроводимости. Бардин называет эту концепцию В.Л. "моделью Гинзбурга с энергетической щелью". Действительно, В.Л. пишет [3]: "Ясно, что в модели свободных электронов нельзя получить сверхпроводимости, причем обычный учёт влияния кристаллической решётки (т.е. учёт периодического потенциального поля) ничего здесь изменить не может. Для возникновения сверхпроводимости в модели, которая базируется на приближении независимых электронов, необходимо появление какой-то щели в энергетическом спектре на границе Ферми ... с шириной, равной $\Delta \sim T_c$ ". В.Л. отмечает далее, что наличие в сверхпроводниках изотопического эффекта, т.е. зависимости T_c от массы изотопа, приводит к ещё одному необходимому условию для щели: $\Delta \approx 1/\sqrt{\omega}$, где ω — средняя фононная частота. Кроме того, в [3] подчёркнуто, что эта щель не может быть получена в рамках теории возмущений. Таким образом, чёткая и ясная программа для работы команды БКШ была сформулирована.

И Гинзбург, и Бардин, судя по всему, понимали, что соотношение $\Delta \approx 1/\sqrt{\omega}$ можно получить лишь за счёт электрон-фононного взаимодействия. В обзоре [18] добавлена одна существенная деталь, отсутствовавшая у Гинзбурга, а именно, что щель должна обращаться в нуль в точке перехода при $T = T_c$. В.Л. в своей заметке "Опыт научной автобиографии" [9, с. 212] самокритично написал: "Я и тогда понимал, а сейчас ещё яснее вижу, что создание микротории сверхпроводимости было не в моих возможностях". По-видимому, что-то похожее ощущал и Бардин, и, возможно, поэтому в его команду был приглашён бывший аспирант Янга Л. Купер, знакомый с математической техникой, необходимой для выхода за пределы теории возмущений. В нашей стране в 1955 г. были специалисты и по теории электрон-фононного взаимодействия, и по технике решения задач вне рамок теории возмущений. Это были высококлассные специалисты, однако микроторию сверхпроводимости создали не они, а Бардин, Купер и Шриффер. Естественно, никто не может объяснить, почему случилось так, а не иначе. Но мне представляется, что одной из причин могло быть игнорирование этими специалистами физи-

ческих основ микротории, сформулированных Гинзбургом, которые были ясно осознаны Бардином. На этом я, пожалуй, и закончу свое воспоминание-исследование о работах В.Л. Гинзбурга середины прошлого столетия.

Список литературы

1. Гинзбург В Л, Ландау Л Д *ЖЭТФ* **20** 1064 (1950)
2. Гинзбург В Л *УФН* **42** 169 (1950); **42** 333 (1950)
3. Гинзбург В Л *УФН* **48** 25 (1952); Ginzburg V L *Fortschr. Phys.* **1** 101 (1953)
4. Абрикосов А А *ЖЭТФ* **32** 1442 (1957) [Abrikosov A A *Sov. Phys. JETP* **5** 1174 (1957)]
5. Абрикосов А А *УФН* **174** 1234 (2004); Abrikosov A A *Rev. Mod. Phys.* **76** 975 (2004)]
6. Гинзбург В Л "Сверхпроводимость и сверхтекучесть (что удалось и чего не удалось сделать)" *УФН* **167** 429 (1997) [Ginzburg V L "Superconductivity and superfluidity (what was done and what was not)" *Phys. Usp.* **40** 407 (1997)]
7. Гинзбург В Л "Сверхпроводимость: позавчера, вчера, сегодня, завтра" *УФН* **170** 619 (2000) [Ginzburg V L "Superconductivity: the day before yesterday — yesterday — today — tomorrow" *Phys. Usp.* **43** 573 (2000)]
8. Гинзбург В Л "О сверхпроводимости и сверхтекучести (что мне удалось сделать, а что не удалось), а также о "физическом минимуме" на начало XXI века" *УФН* **174** 1240 (2004) [Ginzburg V L "On superconductivity and superfluidity (what I have and have not managed to do), as well as on the 'physical minimum' at the beginning of the XXI century (December 8, 2003)" *Phys. Usp.* **47** 1155 (2004); *Rev. Mod. Phys.* **76** 981 (2004)]
9. Гинзбург В Л *О сверхпроводимости и сверхтекучести. Автобиография* (М.: Физматлит, 2006) [Ginzburg V L *On Superconductivity and Superfluidity: a Scientific Autobiography* (Berlin: Springer-Verlag, 2009)]
10. Feynman R P *Prog. Low Temp. Phys.* **1** 17 (1955)
11. Гинзбург В Л *Сверхпроводимость* (М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1946)
12. Абрикосов А А *ДАН СССР* **86** 489 (1952)
13. Заварицкий Н В *ДАН СССР* **86** 501 (1952)
14. Шубников Л В и др. *ЖЭТФ* **7** 221 (1937)
15. Гинзбург В Л *ЖЭТФ* **29** 748 (1955) [Ginzburg V L *Sov. Phys. JETP* **2** 589 (1956)]
16. Горьков Л П *ЖЭТФ* **36** 1918 (1959); **37** 1407 (1959) [Gor'kov L P *Sov. Phys. JETP* **9** 1364 (1959); **10** 998 (1960)]
17. Гинзбург В Л *ЖЭТФ* **42** 299 (1962) [Ginzburg V L *Sov. Phys. JETP* **15** 207 (1962)]
18. Bardeen J, in *Kältephysik* (Handbuch der Physik, Bd. 15, Ed. S Flüge) (Berlin: Springer-Verlag, 1956) [Бардин Дж, в сб. *Физика низких температур* (Под ред. А И Шальникова) (М.: ИЛ, 1959) с. 679]

About Ginzburg – Landau, and a bit about others

E.G. Maksimov

P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,
Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation
Tel./Fax (7-499) 135-85 33. E-mail: maksimov@lpi.ru

This note is a brief history of how the theory of Ginzburg and Landau came to be. Early publications on the macroscopic theory of superconductivity are reviewed in detail. Discussions that the two co-authors had with their colleagues and between themselves are described. The 1952 review by V.L. Ginzburg is discussed, in which a number of well-defined requirements on the yet-to-be-developed microscopic theory of superconductivity were formulated, constituting what J. Bardeen called the "Ginzburg energy gap model".

PACS numbers: **01.65. + g**, **74.20. – z**, **74.25. – q**

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201011f.1231

Bibliography — 18 references

Received 22 September 2010, revised 14 October 2010

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **180** (11) 1231 – 1237 (2010)

Physics – Uspekhi **53** (10) (2010)