

Наука та інновації. 2008. Т. 4. № 5. С. 63–71.

В.В. Слѐзов, И.И. Папиров, А.Г. Шепелев

Национальный научный центр
"Харьковский физико-технический институт", Харьков

ОТКРЫТИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВ II РОДА (ФАЗА ШУБНИКОВА)



Научили горькие уроки —
есть в своем отечестве пророки.
Смелость их берет все города,
правда, запоздало иногда.

Е. Евтушенко,
"Между городом Да и городом Нет"

Вкратце излагается история экспериментального открытия сверхпроводников II рода (фазы Шубникова), осуществленного выдающимся физиком Л.В. Шубниковым и сотрудниками Украинского физико-технического института (ныне ННЦ ХФТИ) в 1936–1937 гг. Приведены оценки этой работы и теории Абрикосова, объяснившей её результаты, крупнейшими в мире специалистами по сверхпроводимости. Отмечается масштаб воздействия этого открытия на современную физику и технику.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сверхпроводники II рода, магнитные системы, электротехника, термоядерные реакторы, ускорители частиц, медицинская диагностика, скоростной транспорт, магнитная сепарация.

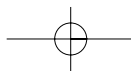
В 2011 г. научная общественность будет отмечать 100-летний юбилей открытия Камерлингом Оннесом [1] сверхпроводимости в чистых металлах. Сверхпроводимость — широко распространенное явление: более двадцати чистых металлов и тысячи сплавов и соединений при понижении температуры ниже критической T_k скачком теряют электрическое сопротивление до величины удельного электросопротивления, меньшей 10^{-23} Ом·см. Напомним, что удельное электросопротивление такого хорошего проводника, как чистая медь, в области температур вблизи абсолютного нуля составляет приблизительно 10^{-9} Ом·см. Значения T_k для чистых сверхпроводников варьируются в широком интервале температур от 0,01 К для W до 9,2 К для Nb.

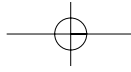
Необходимо отметить, что явление сверхпроводимости было загадкой для крупнейших

физиков мира около 50 лет. В 1914 г. Камерлинг Оннес [2] обнаружил, что при достижении внешним магнитным полем порогового значения, H_k в чистых сверхпроводниках происходит резкое разрушение сверхпроводимости, когда электросопротивление скачком меняется от нуля до значения, характерного для нормального состояния металлов при $T > T_k$. Величина H_k зависит от температуры и конкретного сверхпроводника (диапазон изменения H_k вблизи абсолютного нуля температур от 1 Э для W до 2000 Э для Nb).

Кроме резкого исчезновения электросопротивления при охлаждении чистого сверхпроводника ниже T_k в нем существенно меняются и магнитные свойства. В 1933 г. Мейснер и Оксенфельд [3] обнаружили, что магнитное поле $H < H_k$ в чистый сверхпроводник не проникает, и магнитная индукция в нем $B = 0$.

© В.В. СЛѐЗОВ, И.И. ПАПИРОВ, А.Г. ШЕПЕЛЕВ, 2008





Дальнейшие экспериментальные исследования показали, что поведение сверхпроводящих сплавов в магнитном поле кардинально отличается от поведения чистых сверхпроводников.

В соответствии с современными представлениями о сверхпроводимости для соотношения между глубиной проникновения магнитного поля в сверхпроводник λ и длиной когерентности ξ между электронами в парах существует критическое значение постоянной Гинзбурга—Ландау $\kappa_c = \lambda / \xi = 1/\sqrt{2}$. При $\kappa < \kappa_c$ поверхностная энергия на границе между нормальной и сверхпроводящей фазами положительна. Это сверхпроводники I рода — в основном, чистые металлы, в которых при H_c происходит фазовый переход первого рода. При $\kappa > \kappa_c$ эта энергия отрицательна — это сверхпроводники II рода (в основном, сплавы), в которые внешнее магнитное поле проникает постепенно, начиная с $H = H_{c1}$, в виде решетки "вихрей Абрикосова". При H_{c2} происходит полное разрушение сверхпроводимости.

Однако для понимания сверхпроводимости II рода также потребовалось около 20 лет.

Рассмотрим, как развивались экспериментальные исследования.

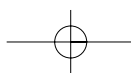
1. В 1929—1930 гг. де Гааз и Воогд, сотрудники лаборатории Камерлинга Оннеса, впервые нашли отличие в поведении сверхпроводящих сплавов от чистых сверхпроводников в магнитном поле [4, 5]. По данным исследования электросопротивления разрушение сверхпроводящих поликристаллов Bi—Tl, Sn—Bi, Sn—Cd, Pb—Tl, Pb—Bi, Sb—Sn магнитным полем происходило в очень широком интервале магнитных полей, а не скачком, как у чистых сверхпроводников. Авторы справедливо указали, что в случае эвтектик (Sn—Bi, Sn—Cd, Pb—Bi) образцы представляли собой смесь 2-х фаз, одна из которых шунтировала весь образец. Отличие же в разрушении магнитным полем исследованных ими сверхпроводящих сплавов Sn с 40 % Sb и Pb с 67 % Tl по отношению к чистым сверхпроводникам авторы от-

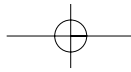
несли к возможному влиянию неоднородностей в образцах.

2. 26 октября 1934 г. Мендельсон с сотрудниками направили в наиболее рейтинговый в то время журнал "Nature" статью об исследовании зависимости индукции от магнитного поля в чистых сверхпроводниках Hg, Sn, Pb и сплавах Pb—Bi, Sn—Cd, Sn—Bi (опубликовано 17 ноября 1934 г. [6]). Оказалось, что при постоянной температуре $T < T_c$ "в большинстве случаев изменение индукции не происходит при определенной величине магнитного поля, а растягивается на интервал поля в 10—20 % от порогового значения".

22 декабря 1934 г. на заседании Королевской Академии Наук Нидерландов де Гааз и Казимир-Йонкер [7] впервые обосновано сообщили о том, что в поликристаллах сплавов Bi с 38 % Tl и Pb с 65 % Tl наблюдается постепенное проникновение внешнего магнитного поля внутрь сверхпроводника. Было показано, что в сплавах существует 3 характерных поля. По мере увеличения внешнего поля только начиная с некоторого его значения (существенно меньшего критического поля, полностью разрушающего сверхпроводимость, и поля, которое начинает постепенно разрушать сверхпроводимость по данным электросопротивления) происходит проникновение магнитного поля в сверхпроводящий сплав. Так, например, для Pb с 65 % Tl при $T = 3,5$ К начало проникновения магнитного поля происходило при 35 Э (до этой величины поля эффект Мейсснера выполнялся), а полному разрушению сверхпроводимости соответствовало поле 347 Э (заметим, что начало разрушения сверхпроводимости по данным электросопротивления возникало при 113 Э). Авторы измерили и температурную зависимость всех 3-х полей.

Еще до этого выступления эти авторы 7 декабря 1934 г. направили свои результаты в журнал "Nature", опубликовавший статью 5 января 1935 г. [8]. Подробная статья также была опубликована в январе 1935 г. в единственном на то время специализированном низкотемпе-





ратурном журнале *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden* [9]. Именно наблюдение этих авторов как пионерское было изложено в первой в мире монографии по сверхпроводимости Шенберга [10].

13 апреля 1935 г. Рябинин, Шубников [11] в том же "Nature", где ранее публиковалась заметка де Гааза и Казимир-Йонкера [8], опубликовали свой материал об исследовании 2-х образцов Pb с 67 % Tl и Pb с 35 % Bi, где подтверждалось, что до определенного магнитного поля оно в сплав не проникает, после чего до поля разрушения сверхпроводимости происходит постепенное увеличение проникновения поля. Этими авторами было введено соответствующее обозначение этих полей $H_{к1}$ и $H_{к2}$. В более подробной статье [12], направленной в печать 27 января 1935 г. (т.е. спустя почти 2 месяца после направления в печать статьи де Гааза и Казимир-Йонкера [8]), Рябинин и Шубников для того же образца Pb с 67 % Tl измерили температурную зависимость $H_{к1}$, $H_{к2}$ и поля тока H_J . При этом авторы, подобно тому, как ранее указывали де Гааз и Вогдт [4, 5], не исключили возможность того, что "необычное поведение сверхпроводящих сплавов может вызываться их неоднородностью, которая может объясняться распадом твердого раствора и образованием новой сильнодисперсной фазы" [12].

В статьях 1936 г. [13] и 1937 г. [14] Шубников, Хоткевич, Шепелев, Рябинин повторили: "В нашей первой работе по исследованию сверхпроводящих сплавов мы указали на возможность объяснения необычных магнитных свойств сверхпроводящих сплавов тем, что твердые растворы при низкой температуре распадаются".

18 мая 1935 г. Мендельсон и Мур [15] в том же "Nature" также подтвердили наличие двух полей в сплаве Pb с 70 % Bi и ввели гипотезу о "губке Мендельсона" (подробней см. [16]), которая доминировала 20–25 лет при объяснении свойств сверхпроводящих сплавов, хотя оказалось ошибочной [17]. Гипотеза своди-

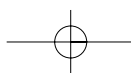
лась к тому, что в сплавах присутствуют неоднородности состава, структуры и внутренних деформаций, вследствие чего образуются многосвязные тонкие образования с аномально высокими критическими полями, которые служат токовыми путями.

3. Оценка работ де Гааза с сотр. [7–9], Рябинина, Шубникова [11, 12] и Мендельсона, Мура [15] была дана специалистами по сверхпроводимости того времени только в двух публикациях.

Шубников, Хоткевич, Шепелев, Рябинин в статьях [13, 14] указали: "Де Гааз и Казимир-Йонкер [8, 9] впервые нашли, что для сплавов $PbTl_2$ и Bi_5Tl_3 существует критическое магнитное поле, которое проникает в сплав, но не разрушает сверхпроводимости, почему оно значительно ниже критического магнитного поля, при котором сплав приобретает омическое сопротивление".

Шенберг во 2-м издании своей монографии [18] отметил: "Де Гааз и Казимир-Йонкер [8], применяя висмутовые измерители поля, показали, что на самом деле магнитное поле начинает проникать в сплав задолго до того, как оно достигнет величины, достаточной для восстановления первых следов сопротивления. Это проникновение оказывается почти полным в полях такого же порядка величины, как и для чистых элементов. Подобные результаты получили Мендельсон и Мур [15], а также Рябинин и Шубников [11, 12]".

4. Несмотря на то, что большинство вышеуказанных экспериментальных исследований было опубликовано в широко известных журналах "Nature" и "Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden", на эти работы практически никто не ссылался. Не случайно в своей Нобелевской лекции В.Л. Гинзбург [19], обсуждая свою с Ландау феноменологическую теорию сверхпроводимости [20], заметил, что в отношении сверхпроводящих сплавов в то время "понимания ситуации не было, и мы с Ландау, как и многие другие, считали, что сплавы — "дело грязное" и не интересовались ими, ограничив-



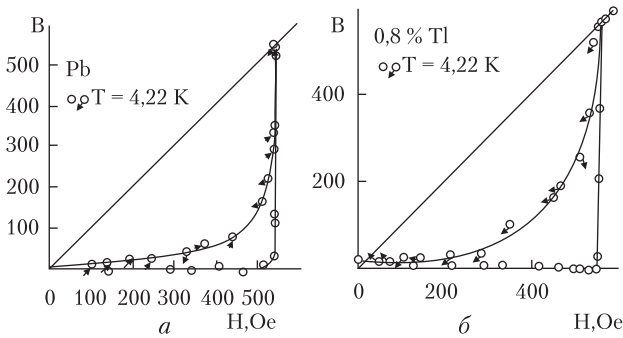


Рис. 1. Зависимость индукции от магнитного поля в монокристаллических сверхпроводниках: чистый свинец (а) и сплав Рb с 0,8 % Тl (б) [13, 14]

ишь материалами с $\kappa > \kappa_c$, для которых $\sigma_{ns} > 0$, т.е. сверхпроводниками I рода". Позже (со ссылкой на работу Шубникова с сотрудниками [14]) указывалось, что "наиболее яркое применение теории Гинзбурга—Ландау [20] относится к описанию свойств сверхпроводящих сплавов" [21]).

5. Из фазовых диаграмм (см., напр., [22]) следует, что все изучавшиеся в рассмотренных работах образцы (кроме образцов Рb—Тl) были неоднородными, т.е. исследованные образцы были явно неоднородными.

В 1936—1937 гг. Шубниковым, Хоткевичем, Шепелевым, Рябининым [13, 14] были опубликованы результаты детального исследования магнитных свойств тщательно приготовленных однофазных монокристаллов сплавов Рb—Тl (0,8; 2,5; 5; 15; 30 и 50 %) и Рb—In (2; 8 %). Именно в этой работе авторами впервые было убедительно показано что:

1) Существует граница по концентрации примеси в сверхпроводящих сплавах, до которой их магнитные свойства подобны магнитным свойствам чистых сверхпроводников (полный эффект Мейсснера при полях, меньших критических, и резкое разрушение сверхпроводимости при дальнейшем увеличении поля) (рис. 1).

При увеличении концентрации примеси за эту границу (в рамках современных представлений — с ростом параметра Гинзбурга—Лан-

дау $\kappa = \lambda / \xi$) магнитные свойства сплавов резко отличаются: эффект Мейсснера существует только до магнитного поля $H < H_{k1}$. С ростом поля сплавы остаются сверхпроводящими до $H < H_{k2}$, но при этом магнитное поле постепенно проникает в образец (рис. 2).

Интервал между H_{k1} и H_{k2} расширяется с увеличением концентрации примеси — H_{k1} уменьшается, а H_{k2} растет (с увеличением параметра κ) (см. рис. 3).

2) Столь необычные магнитные свойства сверхпроводников не могут быть объяснены гистерезисными явлениями, т.к. именно при высоких увеличивающихся и уменьшающихся полях явление довольно хорошо обратимо, и гистерезис довольно мал.

3) Разность свободной энергии намагниченного и нормального сверхпроводника дается площадью кривой $\Delta F = \int M dH$, где M — намагниченность, а разность энтропии произ-

водной $\Delta S = -\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_B$.

Подсчет разности энтропий, произведенный для сплавов, показывает, что в этом случае так же, как и в случае чистых металлов, это величины одного порядка, подобным образом зависящие от температуры. Поэтому скачок теплоемкости в нулевом магнитном поле для сплава сопоставим с чистым сверхпроводником

4) Показано, что по рентгеновским исследованиям сверхпроводящих сплавов отсутствует распад твердого раствора (сплавы однофазны). Это противоречило предыдущим представлениям о том, что их особые сверхпроводящие свойства вызваны влиянием неоднородностей.

Таким образом, именно в этих работах Шубникова, Хоткевича, Шепелева, Рябинина впервые был сделан правильный вывод о существовании нового типа сверхпроводников в противоположность более ранним работам [4—9, 11, 12, 15], в том числе и работам Рябинина, Шубникова 1935 г., которые обосновывали получавшиеся до того результаты неоднородностями состава и структуры образцов.

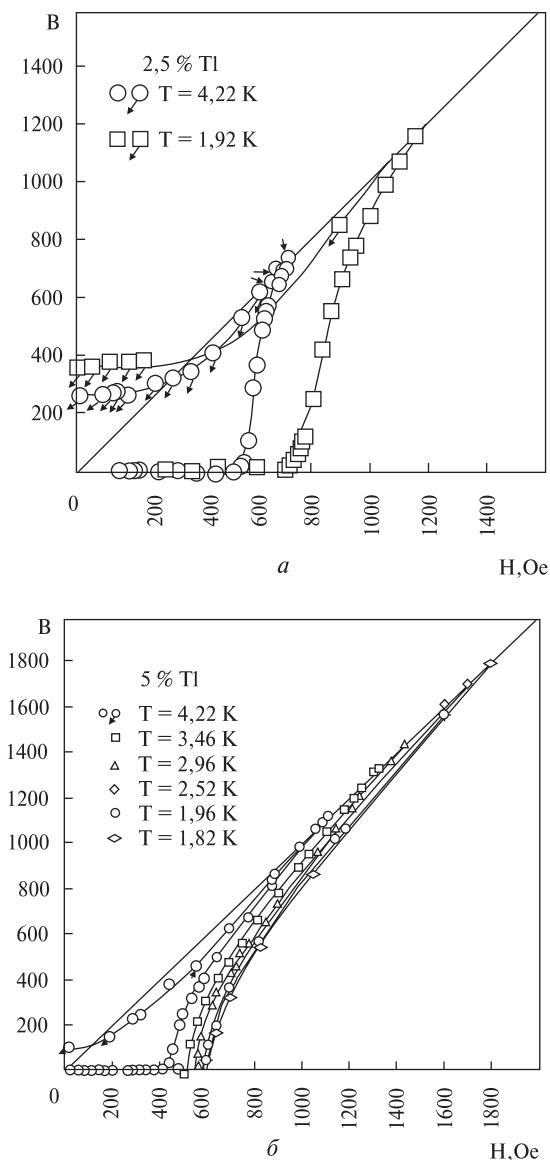
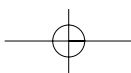


Рис. 2. Зависимость индукции от магнитного поля в монокристаллах сверхпроводящих сплавов: Pb с 2,5% Tl (а) и Pb с 5% Tl (б) [13, 14]

Отметим, что первой диссертационной работой, защищенной в Криогенной лаборатории Л.В. Шубникова, была диссертация Г.Д. Шепелева "Магнитные свойства сверхпроводящих сплавов" (1938 г.), посвященная именно этой тематике.

Обсуждаемое открытие сопровождалось творческой драмой и большой человеческой

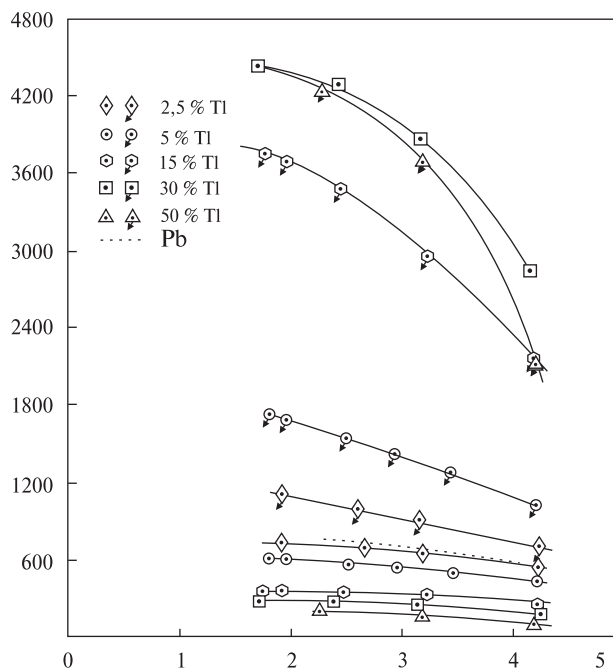
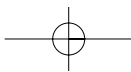
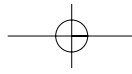


Рис. 3. Изменение критических магнитных полей H_{K1} и H_{K2} для сплавов PbTl при изменении концентрации примеси Tl. Пунктирная кривая — H_K для чистого свинца [13, 14]

трагедией, повлиявшей не только на судьбы двух великих ученых — Л.Д. Ландау и Л.В. Шубникова, — но и, несомненно, на развитие физики. Нобелевский лауреат В.Л. Гинзбург в своем выступлении на Международной конференции "Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости" (2004 г.) отметил: "Л.В. Шубников с учениками и коллегами всего за несколько лет успел сделать очень много, особенно нужно упомянуть исследования сверхпроводящих сплавов и фактическое открытие сверхпроводников II рода. Уверен, что Шубников добился бы еще многих других успехов в науке, и тем горше думать о его безвременной (в возрасте всего 36-ти лет!) и совершенно безвинной гибели под топором сталинского террора." [23].

Творческая драма заключалась в том, что большой друг Л.В. Шубникова — Л.Д. Ландау, — с которым они обсуждали все работы лаборатории, не признал экспериментальное отк-





рытие Шубникова с сотрудниками [13, 14] ни в 1936–37 гг., ни в 1950 г., когда он с В.Л. Гинзбургом создал феноменологическую теорию сверхпроводимости [20], где и был введен параметр Гинзбурга–Ландау α . В публикации 1997 г., названной "Сверхпроводимость и сверхтекучесть (что удалось и чего мне не удалось сделать)", Гинзбург обсуждая теорию [20], определенно указал: "Таким образом, возможность существования сверхпроводников II рода мы, фактически, просмотрели" [24].

Большая человеческая трагедия заключалась в том, что в 1937 г. Шубников был безосновательно арестован и решением Ежова и Вышинского от 28.10.1937 г. расстрелян (реабилитация произошла через 20 лет). Ландау был арестован весной 1938 г. уже как сотрудник Института физических проблем, однако через год был вызволен из тюрьмы под поручительство П.Л. Капицы (Ландау так же был посмертно реабилитирован только в 1990 г.).

6. Первая ссылка на работу Шубникова, Хоткевича, Шепелева, Рябинина как на пионерскую содержится в статье А.А. Абрикосова [25], опубликованной через 20 лет, где автор на основе экспериментальных результатов Шубникова, Хоткевича, Шепелева, Рябинина [14] построил теорию сверхпроводников II рода, которая смогла описать (даже количественно) эти экспериментальные результаты.

Оказалось, что термодинамическое критическое поле H_k примерно равно среднему геометрическому полей H_{k1} и H_{k2} :

$$\frac{H_k}{H_{k1}} \approx \frac{H_{k2}}{H_k} \approx \sqrt{2} \cdot \alpha.$$

Таким образом, чем больше α , тем меньше величина H_{k1} и тем больше H_{k2} , что соответствует экспериментальным результатам Шубникова с сотрудниками [13, 14]. При этом в то время как в сверхпроводниках I рода разрушение сверхпроводимости совершается по механизму фазового перехода первого рода, в сверхпроводниках II рода при H_{k1} и H_{k2} имеют место фазовые переходы второго рода.

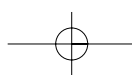
Триумфальное признание работ Шубникова, Хоткевича, Шепелева, Рябинина началось с Международной конференции по сверхпроводимости (США, 1963 г.), где Решением конференции из 350 специалистов по сверхпроводимости под председательством единственного дважды Нобелевского лауреата по физике Дж. Бардина было признано [26]: "Следует отметить, что наше теоретическое понимание сверхпроводников II рода связано в основном с Ландау, Гинзбургом, Абрикосовым и Горьковым, а первые определяющие эксперименты были выполнены в 1937 г. Шубниковым".

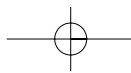
На конференции "Superconductivity in Science and Technology", состоявшейся в США в 1966 г., Дж. Бардин, излагая историю сверхпроводников II рода, отметил [27]: "Явление было открыто экспериментально русским физиком Шубниковым [13] около 1937 г."

Приведем оценку работы Шубникова с сотрудниками классиком низкотемпературной физики Мендельсоном: "Сделать однородный сплав без дефектов решетки исключительно трудно. Из всех групп, занятых низкотемпературными исследованиями в тридцатых годах, группа Л.В. Шубникова в Харькове имела, очевидно, наилучший комплекс знаний в области металлургии" [28].

В известном двухтомнике "Superconductivity", изданном в 1969 г., Нобелевский лауреат Ф. Андерсон [29] указал, что Запад недооценивал работу Абрикосова [25] и эксперименты Шубникова, Хоткевича, Шепелева, Рябинина [14], "которые вместе обосновали и почти завершили науку о сверхпроводниках II рода". В статье "Сверхпроводники II рода. Эксперименты" [30] специалист в области сверхпроводимости Б. Серин начал описание ранних исследований сверхпроводников II рода словами: "Первые основополагающие эксперименты были сделаны Шубниковым с сотрудниками [13, 14] в 1937 г."

40 лет тому назад Нобелевский лауреат П. Де Жен [31], со ссылкой на работу Шубникова с сотрудниками 1937 г., ввел определение "фаза





Шубникова", которое широко используется мировой научной общественностью.

В докладе на Симпозиуме, проходившем в США в 1986 г. под председательством Дж. Бардина и посвященном 75-летию со дня открытия сверхпроводимости, известный специалист Т. Берлинкорт [17] указал, что "Шубников с сотрудниками [14] сделали решающий эксперимент и правильно его интерпретировали".

Созданная Л.В. Шубниковым с сотрудниками [13, 14] и А.А. Абрикосовым [25] концепция сверхпроводников II рода вошла в Золотой фонд мировой науки и излагается во всех монографиях, посвященных сверхпроводимости. Авторы теории сверхпроводимости Гинзбурга—Ландау [20] и основанной на ней теории сверхпроводников II рода Абрикосова [25], базирующейся на экспериментальных результатах Шубникова, Хоткевича, Шепелева, Рябинина [14], как известно, получили Нобелевскую премию в 2003 г.

7. Интересно, что все открытые за последнее почти полвека сверхпроводники, начиная с Nb_3Sn и кончая ВТСП купратами, фуллеренами, MgB_2 , являются сверхпроводниками II рода. Оценки показывают, что вблизи абсолютного нуля температур величина H_{c2} , например у купратов, может превышать многие сотни кЭ.

Отметим также, что в последнее время во всем мире сверхпроводники II рода начали широко применяться во многих областях науки и техники:

- + еще 20 лет тому назад в мире насчитывалось более тысячи сверхпроводящих соленоидов из $Nb-Ti$ с отверстием 1 м для ЯМР-исследований всего тела человека;
- + около 6 лет тому назад в США и Дании начали эксплуатироваться 3 линии электропередач на $Bi-ВТСП$;
- + заметный прогресс достигнут на пути создания поездов на магнитной подвеске — в декабре 2003 г. в Японии зафиксирована скорость 581 км/ч;
- + без сверхпроводников II рода невозможно создать ни одну крупную магнитную систе-

му. В качестве примера упомянем магнитную систему (около 2 тысяч сверхпроводящих соленоидов) Большого адронного коллайдера длиной 27 км [32]), а также крупнейший в мире сверхпроводящий соленоид длиной 13 м, внутренним диаметром 6 м с магнитным полем 4 Т и запасенной энергией 2,5 ГДж [33], созданный для Мюонного спектрометра.

Учитывая вышеизложенное, в 2001 г. Президиум НАН Украины принял Постановление об учреждении премии имени Л.В. Шубникова за выдающиеся работы в области экспериментальной физики. Отметим также, что в США учреждено почетное звание "шубниковский профессор", которым отмечен директор Центра прикладной сверхпроводимости Д. Ларбалестиер.

Понимая, что роль и значение сверхпроводников II рода будут еще больше возрастать, охватывая все больше областей науки и техники, считаем целесообразным установить на главном корпусе старой площадки Института соответствующую Мемориальную доску:

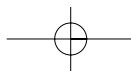
"Впервые в мире в 1935/1936 гг. в этом здании ученые УФТМ Л.В. Шубников, В.И. Хоткевич, Г.Д. Шепелев, Ю.Н. Рябинин экспериментально открыли явление сверхпроводимости II рода (фазу Шубникова)"

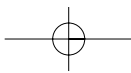
Ученый Совет Института теоретической физики им. А.И. Ахиезера на своем заседании 27.06.2008 г. единогласно поддержал это предложение (протокол № 9).

Авторы признательны академику РАН В.Л. Гинзбургу, академику НАН Украины В.В. Еременко, проф. М.Я. Азбелю, проф. Ю.Н. Ранюку, проф. П.В. Сорокину за обсуждение.

ЛИТЕРАТУРА

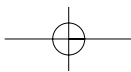
1. H. Kamerlingh Onnes. The disappearance of the resistance of mercury // Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden. — 1911. — № 122b. — P. 13–15.
2. H. Kamerlingh Onnes. The appearance of the resistance in superconductors, which are brought into a magnetic

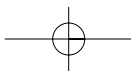




До 90-річчя Національної академії наук України

- field, at a threshold value of the field // *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden.* — 1914. — № 139f. — P. 65–71.
3. *W. Meissner, R. Ochsenfeld.* Ein neuer Effekt bei Eintritt der supraleitfähigkeit // *Naturwiss.* — 1933. — Bd. 33, № 44. — S. 787–788.
 4. *W.J. De Haas, J. Voogd.* Disturbance of the superconductivity of the compound Bi₅Tl₃ and of the alloys Sn-Bi and Sn-Cd by magnetic fields // *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden.* — 1929. — № 199d. — P. 31–40.
 5. *W.J. De Haas, J. Voogd.* The influence of magnetic fields on superconductors // *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden.* — 1930. — № 2 08b. — P. 9–20.
 6. *T.C. Keeley, K. Mendelssohn, J.R. Moore.* Experiments on supraconductors // *Nature.* — 1934. — V. 134, № 3394. — P. 773–774.
 7. *W.J. De Haas, J.M. Casimir-Jonker.* Penetration of magnetic field into superconductive alloys // *Proc. Roy. Acad. Amsterdam, Proc. Sec. Sci.* — 1935. — V. 38, № 1. — P. 2–7.
 8. *W.J. De Haas, J.M. Casimir-Jonker.* Penetration of magnetic field into superconductive alloys // *Nature.* — 1935. — V. 135, № 3401. — P. 30–31.
 9. *W.J. De Haas, J.M. Casimir-Jonker.* Penetration of magnetic field into superconductive alloys // *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden.* — 1935. — № 233. — P. 1–7.
 10. *Шенберг Д.* Сверхпроводимость // *УФН.* — 1938. — Т. 19, № 4. — С. 448–491; там же. — Т. 20, № 1. — С. 1–28; *D. Shoenberg.* Superconductivity, Cambridge: University Press. — 1938. — 111 p.
 11. *J.N. Rjabinin, L.W. Schubnikow.* Magnetic properties and critical currents of superconducting alloys // *Nature.* — 1935. — V. 135, № 3415. — P. 581–582.
 12. *J.N. Rjabinin, L.W. Schubnikow.* Magnetic properties and critical currents of superconducting alloys // *Phys. Z. Sowjet.* — 1935. — V. 7, № 1. — P. 122–125.
 13. *L.W. Schubnikow, W.I. Chotkewitsch, J.D. Schepelaw, J.N. Rjabinin.* Magnetische Eigenschaften supraleitender Metalle und Legierungen // *Phys. Z. Sowjet.* — 1936. — V. 10, H. 2. — S. 165–192.
 14. *Шубников Л.В., Хоткевич В.И., Шепелев Ю.Д., Рябинин Ю.Н.* Магнитные свойства сверхпроводящих металлов и сплавов // *ЖЭТФ.* — 1937. — Т. 7, № 2. — С. 221–237.
 15. *K. Mendelssohn, J.R. Moore.* Surpa-conducting alloys // *Nature.* — 1935. — V. 135, № 3420. — P. 826–827.
 16. *J.C. McLennan, J.D. Cockroft, D. Shoenberg, et all.* A Discussion on superconductivity and other low temperature phenomena // *Proc. Roy. Soc.* — 1935. — V. 152A, № 875. — P. 1–46.
 17. *T.G. Berlincourt.* Type II superconductivity: quest for understanding // *IEEE Trans. Magnetics.* — 1987. — V.MAG-26, No. 2. — P. 403–412.
 18. *D. Shoenberg.* Superconductivity (2nd ed.). Cambridge, University Press. — 1952. — 253 p.; *Д. Шенберг.* Сверхпроводимость. — М.: ИЛ, 1955. — 242 с.
 19. *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.* — 2004. — Т. 174. — С. 1240–1255.
 20. *Гинзбург В.Л., Ландау Л.Д.* К теории сверхпроводимости // *ЖЭТФ.* — 1950. — Т. 20, № 12. — С. 1064–1082.
 21. *B.S. Chandrasekar.* Early experiments and phenomenological theory. In: *Superconductivity* (ed.R.D.Parks), N.Y.: Marcel Dekker, Inc. — 1969. — V. 1. — P. 1–49.
 22. *Binary Alloy Phase Diagrams.* (Т.В. Massalski, Editor-in-Chif), Metals Park, Ohio: American Society for Metals. — 1987. — 2 v. — 2224 p.
 23. *Гинзбург В.Л.* Несколько замечаний об изучении сверхпроводимости. // *УФН.* — 2005. — Т. 175, № 2. — С. 187–189.
 24. *Гинзбург В.Л.* Сверхпроводимость и сверхтекучесть (что удалось и чего мне не удалось сделать) // *УФН.* — 1997. — Т. 167. — С. 429–454.
 25. *Абрикосов А.А.* О магнитных свойствах сверхпроводников второй группы // *ЖЭТФ.* — 1957. — Т. 32, № 6. — С. 1442–1452.
 26. *J. Bardeen, R.W. Schmitt.* International conference on the science of superconductivity // *Revs. Modern Physics.* — 1964. — V. 36, № 1, Pt. 1. — P. 1–2.
 27. *J. Bardeen.* Theory of superconductivity. In: *Superconductivity in Science and Technology* (ed. M.H.Cohen), Chicago&London: University of Chicago Press. — 1968. — P. 1–17.
 28. *K. Mendelssohn.* The Quest for Absolute Zero. The Meaning of Low Temperature Physics, N.Y.: McGraw-Hill Book Company. — 1966. — 256 p.; *К. Мендельсон.* На пути к абсолютному нулю. Введение в физику низких температур. — М.: Атомиздат, 1971. — 225 с.
 29. *P.W. Anderson.* Superconductivity in past and future. In: *Superconductivity* (ed.R.D.Parks), N. Y.: Marcel Dekker, Inc. — 1969. V. 2. — P. 1343–1358.
 30. *B. Serin.* Superconductivity. Experimental part. In: *Superconductivity* (ed. R.D.Parks), N.Y.: Marcel Dekker, Inc. — 1969. — V. 2. — P. 925–976.
 31. *P.G. de Gennes.* Superconductivity of metals and alloys, N.Y.; Amsterdam: W.A. Benjamin, Inc, 1966. 274p.; *П. де Жен.* Сверхпроводимость металлов и сплавов. — М.: Мир, 1968. — 280 с.
 32. *Anon.* First dipole descends to LHC // *CERN Courier.* 2005. V. 45, № 3, P. 5; *L. Rossi.* The longest journey: the LHC dipoles arrive on time. — 2006. — V. 46, № 8. — P. 28–32.
 33. *Anon.* CMS magnet reaches full field after eight years of construction // *Ibid.* P.6; *Anon.* CMS closes up for magnet test and cosmic challenge // *Ibid.* — № 6. — P. 28–29.





До 90-річчя Національної академії наук України

В.В. Сльозов, І.І. Папіров, А.Г. Шепелев

**ВІДКРИТТЯ НАДПРОВІДНИКІВ ІІ РОДУ
(ФАЗИ ШУБНІКОВА)**

Коротко освітлюється історія експериментального відкриття надпровідників ІІ роду (фази Шубнікова), зробленого видатним фізиком Л.В. Шубніковим з співробітниками в Українському фізико-технічному інституті (нині ННЦ ХФТІ) в 1936–1937 рр. Наведені оцінки цієї роботи і теорії Абрикосова, що пояснила її результати, видатними спеціалістами по надпровідності. Відмічається масштаб впливу цього відкриття на сучасну фізику і техніку.

Ключові слова: надпровідники ІІ роду, магнітні системи, електротехніка, термоядерні реактори, прискорювачі частинок, медична діагностика, швидкісний транспорт, магнітна сепарація.

V.V. Slezov, I.I. Papirov, A.G. Shepelev

**DISCOVERY OF SUPERCONDUCTORS OF II KIND
(SHUBNIKOV PHASE)**

A short history of the experimental discovery of superconductors of II kind (Shubnikov phase) that was made by the notable physicist L.V.Shubnikov and his colleagues at the Ukrainian Institute of Physics and Technology (now NSC KIPT) in 1936–1937 is presented. Appreciation of the value of this work and the Abrikosov theory that explained this research study by the prominent specialists in the field of superconductivity is given. The great importance of this discovery for the contemporary physics and current technology is emphasized.

Key words: superconductivity II kind, magnetic system, electrical engineering, thermonuclear reactors, particle accelerator, medical diagnosis, high-speed transport, magnetic separation.

Надійшла до редакції 06.06.08.

