

## Приоритет молдавских физиков в создании и развитии многозонной теории сверхпроводимости

26 сентября отмечался юбилей прославленных физиков–теоретиков братьев Москаленко – Всеволода Анатольевича и Святослава Анатольевича. В статье основное внимание уделено академику Всеволоду Анатольевичу Москаленко в силу того, что автор всю свою трудовую жизнь (со студенческих лет) участвовал в научных исследованиях, являясь соавтором ряда работ В.А. Москаленко, а также продолжателем развития теории сверхпроводимости.

В 1946 году создается Кишиневский государственный университет, в состав которого вошло несколько естественных факультетов, в том числе и немногочисленный физико-математический. Среди студентов были способные и целеустремленные молодые люди, желающие учиться и достигать высоких результатов. Приглашенные специалисты из Киева, Ленинграда, Одессы наладили учебный процесс и в определенной мере научные исследования. В то же время большое внимание уделялось самостоятельной работе студентов – изучались существующие научные проблемы, используя соответствующую литературу. Была создана база для развития исследований в области теоретической физики. Одним из лидеров в этой области науки в Молдове стал В.А. Москаленко, возглавивший Отдел теоретической физики накануне создания Института прикладной физики.

Автор статьи, выполняя дипломную работу под руководством В.А. Москаленко, вспоминает, что допоздна работал в библиотеке или вестибюле общежития (другого места для этого не было), занимаясь теорией поляронов и оптическими свойствами полупроводников. В те годы В.А. Москаленко написал ряд работ по теории поляронов, которые не потеряли актуальности и в настоящее время: даже сейчас можно найти ссылки на эти работы как базисные.

В одном из физических журналов В.А. Москаленко обнаружил работу академика Н.Н. Боголюбова, изучил её и поехал в Москву для личного знакомства с академиком и его учениками, что было совсем непросто. Только твердый характер и целеустремленность позволили В.А. Москаленко стать стажером в коллективе сотрудников акад. Боголюбова. В Институте математики им. В.А. Стеклова познакомился с выдающимися физиками, профессорами С.В. Тябликовым, Д.Н. Зубаревым и др., которые в течение многих лет поддерживали научные связи с Отделом статистической физики ИПФ АНМ.

Конец пятидесятих годов прошлого века был очень бурным в развитии мировой физической науки. После открытия Камерленга Оннеса в 1911 г. сверхпроводимости при исследовании свойств ртути в области низких температур почти 50 лет ученые пытались определить механизм и происхождение этого явления. Было выполнено огромное количество теоретических и экспериментальных работ. Наконец в 1957 году был получен результат, приведенный в работах Бардина, Купера и Шриффера [1]. Оказалось, что при понижении температуры в критической точке  $T = T_k$  исчезает сопротивление и движение электронов не испытывает препятствий. Было показано, что механизм сверхпроводимости объясняется образованием связанных пар электронов с противоположными импульсами и спинами благодаря косвенному притяжению электронов посредством кристаллической решетки. Оставаться в стороне от этого грандиозного открытия было невозможно. В.А. Москаленко, занимавшийся тематикой почти готовой кандидатской диссертации, с головой ушел в исследования по сверхпроводимости.

Построенная в 1957 году теория сверхпроводимости основывалась на идеальной изотропной модели. Первые работы, которые учитывали реальные свойства металлов, принадлежат В.А. Москаленко, Suhl H., Matthias B.T. и Walker L.R. Как следует из приведенной библиографии, статьи В.А. Москаленко [2] поступили в редакцию журнала «Физика металлов и металловедения» на год раньше работ других авторов и вышли из печати на несколько месяцев раньше. Кроме того, в [3] исследовано поведение температуры сверхпроводящего перехода двухзонной модели, в то время как [2] содержат наряду с результатами [3] исследование поведения и других термодинамических характеристик, в частности скачка теплоемкости в точке  $T = T_k$ . Эти обстоятельства позволяют считать, что приоритет в создании двухзонной модели и её применении принадлежит В.А. Москаленко.

Вернувшись из Москвы, В.А. Москаленко организовал интенсивные исследования на основе предложенной им модели для сверхпроводников с перекрывающимися энергетическими зонами. На первых порах исследования велись в диагональном приближении по индексам зон. Следующая модель – образование куперовских пар электронов внутри одной энергетической зоны и переход пары как целого в другую зону. Это приводит к появлению

внутризонного  $V_{nm}$  и межзонного  $V_{nm}$  электронного взаимодействия ( $n \neq m$ ;  $n, m = 1; 2$ ), что ведёт к дополнительному притяжению, способствующему росту температуры сверхпроводящего перехода. Возникают два параметра порядка  $\Delta_{11}$  и  $\Delta_{22}$  в двухзонной модели.

Выполненные в Молдове по инициативе и под руководством В.А. Москаленко исследования свойств двухзонных и многозонных сверхпроводников привлекли внимание ученых разных стран. Образовалось новое направление в физике низких температур – исследование свойств сверхпроводников с анизотропным энергетическим спектром. Наряду с развитием теории шли поиски материалов, обладающих свойствами, присущими многозонным системам.

Интересно отметить, что свойства сверхпроводников с перекрывающимися энергетическими зонами существенно отличаются от однозонных не только в количественном, но и качественном отношении. В двухзонных сверхпроводниках высокие температуры сверхпроводящего перехода возможны не только при притягательном взаимодействии между электронами, но и в случае отталкивания в зависимости от соотношения между константами взаимодействия. В примесном двухзонном сверхпроводнике не выполняется теорема Андерсона при  $\Delta_1 \neq \Delta_2$ , и термодинамические свойства зависят от концентрации примеси.

Используя двухзонную модель и приемлемое значение констант связи, можно получить высокое  $T_c$ , две энергетические щели  $2\Delta_1/T_c > 3,5$  и  $2\Delta_2/T_c < 3,5$ , большое отрицательное значение  $d\ln T_c/d\ln V$ ,  $V$ -объем, положительную кривизну верхнего критического поля вблизи температуры сверхпроводящего перехода и т.д. В двухзонной модели возможно убывание  $T_c$  с ростом разупорядочения.

В дальнейшем рассматривались более сложные двухзонные и многозонные модели для фононного и нефононного механизма сверхпроводимости. Многочисленные новые результаты и история развития теории сверхпроводимости многозонных сверхпроводников приведены в работах [4, 5].

В 1986 году произошло знаковое событие – открытие высокотемпературной сверхпроводимости в оксидных керамиках ( $T_c \sim 100$  К). Эти соединения имеют слоистую структуру и обладают разнообразным набором физических свойств. Наблюдаются фазовые переходы: магнитные, сверхпроводящие, смешанные состояния. Открытие высокотемпературной сверхпроводимости благоприятно повлияло на дальнейшее развитие теории многозонных сверхпроводников. Получены результаты, приводящие к

качественно новым соотношениям физических величин и неплохому согласию теории и эксперимента. Анализ этих результатов позволил опубликовать обзорную статью в журнале «Успехи физических наук» [6]. По мнению ряда ученых, эта статья содержит классические результаты по теории двухзонной сверхпроводимости.

Большой интерес вызвало открытие высокотемпературного интерметаллического соединения  $MgB_2$  ( $T_c \sim 40$  К). Установлено, что при помощи двухзонной модели можно описывать все наблюдаемые аномалии физических характеристик этого соединения. Физические журналы заполнились работами, в которых двухзонная теория сверхпроводимости получила дальнейшее развитие. Молдавские исследователи были поражены тем фактом, что их работы десяти-, двадцатилетней давности западные физики выдавали как новые и именно им принадлежащие, без ссылок на молдавских коллег. Такое отношение было результатом распада Советского Союза и пренебрежения к достижениям советских физиков и физическим журналам. В течение нескольких лет молдавские специалисты добивались признания и справедливости. Следует отметить, что некоторые западные физики помогали в установлении приоритета результатов молдавских исследователей в двухзонной теории. Речь идет о сотрудниках ОИЯИ (Дубна) проф. Т. Мишонове и проф. В. Кресине, которые помогли доказать приоритет многозонной модели В.А. Москаленко перед аналогичной моделью американских ученых [7].

Последний этап открытия новых сверхпроводников начался в 2008 году с появлением работ, в которых представлен новый класс высокотемпературных сверхпроводящих соединений, основанных на  $FeAs$ , с температурой сверхпроводящего перехода  $T_c \sim 55$  К. Существенная особенность этих соединений – их многозонная структура. Поверхность Ферми пересекает пять зон, возникающих от  $d$ -состояний Fe. Важную роль в этих системах играют возможность возникновения состояния волны спиновой плотности и фазовый переход соизмеримое-несоизмеримое состояние, а также возникновение сверхпроводимости.

В соответствии с высказываниями ряда учёных и при наличии опубликованных теоретических работ свойства новых высокотемпературных соединений следует описывать посредством многозонной теории сверхпроводимости. В основу исследований следует положить теорию многозонных сверхпроводников [6], представляющую классическую теорию.

В итоге можно сделать следующий вывод: в Отделе статистической физики ИПФ АНМ построена теория термодинамических и электромагнитных свойств многозонных сверхпроводников, применяемая для описания большинства современных анизотропных систем.

Доказаны приоритет модели многозонной сверхпроводимости В.А. Москаленко в мировом масштабе, а также актуальность теории применительно к современным многозонным реальным сверхпроводникам.

В интересах исследований приводим некоторые зависимости физических величин, полученные на основе двухзонной теории, и провели сравнение с экспериментальными данными. Рассмотрим случай  $\text{MgB}_2$  с переменной плотностью носителей заряда [8] (рис. 1 и 2).

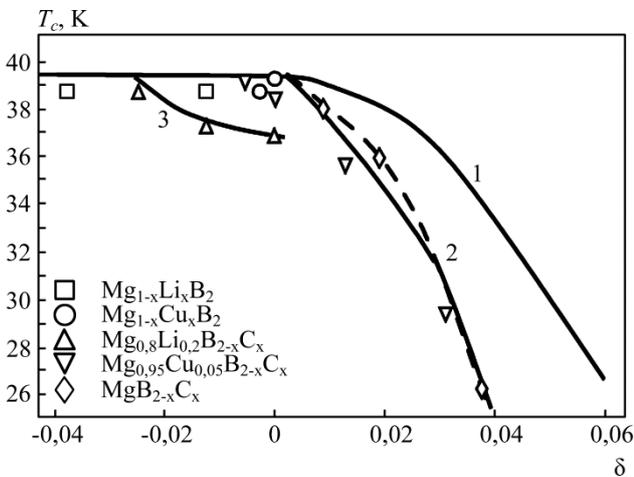


Рис. 1. Температура сверхпроводящего перехода  $T_c$  как функция от относительной плотности носителей заряда  $\delta$  в соединении  $\text{MgB}_2$  [2].

При  $\delta > 0$  растет плотность электронов, при  $\delta < 0$  – плотность дырок. Символы отвечают различным соединениям, на графике – экспериментальные данные [9]. Сплошные кривые – теоретические результаты [8], полученные путем оценки вклада от механизма заполнения энергетических зон электронами и дырками, а также изменения потенциала рассеяния носителей заряда на примеси благодаря слоистой структуре рассматриваемых систем.

Как следует из рис. 1, экспериментальные точки находятся вблизи теоретических на сплошных кривых. Имеется хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных.

Приведенные на рис. 2 кружочки отвечают экспериментальным данным, взятым из работы [11].

Полученные результаты неплохо согласуются с экспериментальными данными магнитных свойств интерметаллического соединения  $\text{MgB}_2$  как чистого, так и допированного электронами и дырками, что говорит о способности двухзонной модели описывать свойства реальных

материалов и вычислять аномалии физических свойств, порожденных анизотропией системы.

В Отделе статистической физики под руководством В.А. Москаленко велись также разработки теории спиновых стекол, теории магнетизма, разрабатывались диаграммные методы решения проблем сильных электронных корреляций. Во всех этих областях достигнуты значительные успехи.

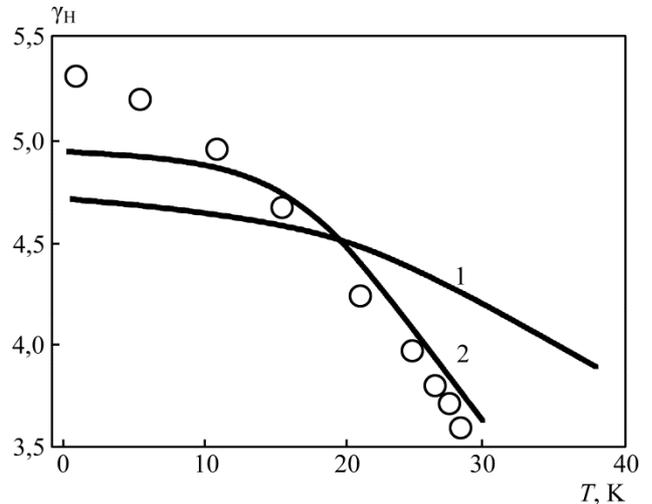


Рис. 2. Теоретическая зависимость коэффициента анизотропии  $\gamma_n = H_{c2}(ab)/H_{c2}(c)$  от температуры для  $\text{MgB}_2$ : 1 – чистого ( $\mu = 0,74$  эВ); 2 – для допированного ( $\mu = 0,76$  эВ) [10].

Хочется отметить постоянное стремление В.А. Москаленко к повышению уровня знаний как своих, так и сотрудников. Для достижения этой цели приложил много сил, что не могло не сказаться на результатах: в Отделе статфизики подготовлено 30 докторов (кандидатов) наук и 5 докторов хабилитат физико-математических наук.

Следует отметить деятельность В.А. Москаленко и его сотрудников на протяжении многих лет по созданию в Институте Отдела теории поля и ядерной материи. Для решения этой задачи было приложено много усилий в преодолении трудностей. Благодаря настойчивости В.А. Москаленко и его помощников удалось добиться открытия такого отдела. Эта деятельность дала возможность Академии наук Молдовы стать членом Объединенного института ядерных исследований в г. Дубна (Россия).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bardeen J., Cooper L.N., Schrieffer L.R. *Phys. Rev.* 1957, **106**, 162; 108, 1175.
2. Москаленко В.А. Препринт. 1958; *Физика металлов и металловедения*. 1959, **8**, 503.
3. Suhl H., Matthias V.T., Walker L.R. *Phys Rev Lett.* 1959, **8**, 552.
4. Palistrant M.E. *Condens Matter Phys.* 2009, **12**, 677; *arxiv: cond – mat/0309707* (2003).

5. Palistrant M.E., Kon L.Z. *Ukr J Phys.* 2010, **55**, 44.
6. Москаленко В.А., Палистрант М.Е., Вакалюк В.М. *Успехи физических наук.* 1991, **161**, 155.
7. Palistrant M.E. *J Supercond Nov Magn.* 2010, **23**, 1441.
8. Палистрант М.Е., Урсу В.А. *ЖЭТФ.* 2007, **131**, 59.
9. Balaselvi S.J. at al. *cond-mat/0303022*.
10. Палистрант М.Е., Чеботарь И.Д., Урсу В.А. *ЖЭТФ.* 2009, **136**, 272.
11. Angst M., Budko S.I. at al. *Phys. Rev. B.* 2005, **71**, 141512.

**Монографии и обзорные статьи в области  
двухзонной многозонной теории  
сверхпроводимости**

1. Moskalenko V.A., Palistrant M.E. *Statistical Physics and Quantum Field Theory.* М.: Наука, 1973. 262 с.
2. Москаленко В.А. *Метод исследования плотностей электронных состояний сверхпроводящих сплавов.* Кишинев: Штиинца, 1974.
3. Москаленко В.А. *Электромагнитные и кинетические свойства сверхпроводящих сплавов с перекрывающимися энергетическими полосами.* Кишинев: Штиинца, 1976.
4. Москаленко В.А., Ника Ю.Н., Дигор Д.Ф. *Туннельные свойства сверхпроводящих сплавов.* Кишинев: Штиинца, 1978.
5. Москаленко В.А., Кон Л.З., Палистрант М.Е. *Низкотемпературные свойства металлов с особенностями зонного спектра.* Кишинев: Штиинца, 1989.
6. Moscalenko V.A., Kon L.Z., Palistrant M.E. *Teoria Supraconductibilității Multi-bandă.* București: Editura tehnică, 2008.
7. Moskalenko V.A., Kon L.Z., Palistrant M.E. *Low Temperature Properties of Metals With Particularities of Band* Bucharest: Spectrum, 2008.
8. Палистрант М.Е., Трифан А.Т. *Теория примесных сверхпроводников под давлением.* Кишинев: Штиинца, 1980, 128.
9. Москаленко В.А., Палистрант М.Е., Вакалюк В.М. *Высокотемпературная сверхпроводимость на основе учета особенностей электронного энергетического спектра.* *УФН.* 1991, **161**(8), 155–178.
10. Palistrant M.E. *Int J Mod Phys. B.* 2005, **19**, 929.
11. Palistrant M.E., Calalb M. *The theory of High-Temperature Superconductivity in Many-band Systems.* Кишинэу, 2007, 168.

*Д.хаб., проф. М.Е. Палистрант*