

ТОДОР МИХАЙЛОВ МИШОНОВ

**Към теорията на високотемпературната  
свръхпроводимост.  
От електронната структура до флуктуационните  
свойства и електродинамичното поведение**

Автореферат  
на дисертация за присъждане на научната степен  
“доктор на физическите науки”

Специалност: 01.03.26. Електрични, магнитни и оптични свойства на кондензираната  
материя

Рецензенти:  
проф. дфн Веселин Ковачев от ИФТТ – БАН  
ст.н.с. I ст. дфн Йордан Бранков от ИМех – БАН  
ст.н.с. I ст. дфн Николай Тончев от ИФТТ – БАН

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на 16. 10. 2007 г. (вторник)  
от 15.00 часа в зала 300 на Института по физика на твърдото тяло при Българската  
академия на науките, 1784 София, бул. “Цариградско шосе” No. 72.

София, 2007

## Анотация

В дисертацията са разгледани основните свойства на високотемпературните свръхпроводници. В рамките на метода на линейните комбинации на атомни орбитали са изведени аналитични формули за електронно зонната структура, които описват добре експерименталните данни и пресмятанията от първи принципи. Показано е, че  $s-d$  взаимодействието включено в БКШ теорията обяснява анизотропията и основните свойства на свръхпроводящия процеп и може да се разглежда като механизъм създаващ високотемпературната свръхпроводимост. Показано е, че аналитичните формули за топлинния капацитет и дълбочината на проникване изведени за  $s-d$  модела описват добре експерименталните данни за практически всички свръхпроводници и се съгласуват с основните резултати на БКШ теорията за свръхпроводници с анизотропен процеп. Предсказани са инфрачервената прозрачност и разпространяването на плазмони в силно анизотропни купрати, а също така разпространяване на двумерни плазмени вълни в тънки свръхпроводящи филми. Предложени са методи за определяне на ефективната маса на куперовите двойки основани на ефектите на електричното поле в свръхпроводниците. Особено внимание е отделено на флукуационните свойства на високотемпературните купрати. Пресметнати са флукуационните поправки към свободната енергия, топлинния капацитет и намагнитеност за слоести свръхпроводници в перпендикулярно магнитно поле, а също така за обемни анизотропни свръхпроводници. Изказана е хипотеза, че линейния температурен ход на електричното съпротивление в нормалната фаза може да се причинява от термодинамичните флукуации на електричното поле перпендикулярно на проводящите слоеве. В рамките на зависещата от времето теория на Гинзбург–Ландау е изведено Болцманово уравнение за флукуационните куперови двойки и с негова помощ са изследвани ефектите на силното електрично поле. Изказана е хипотеза, че преохладените в електрично поле свръхпроводници, под критичната температура могат да имат отрицателна диференциална проводимост, която може да се използва за създаване на принципно нови генератори на електромагнитни вълни в терагерцовата област.



## Съдържание

<b>1</b>	<b>Увод, цели и методи</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Описание и организация на дисертационния труд</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Общи изводи за високотемпературните свръхпроводници</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Основни приноси</b>	<b>7</b>
	<b>Литература</b>	<b>10</b>
	<b>Благодарности и ретроспекция</b>	<b>12</b>

## 1 Увод, цели и методи

В последните 20 години изследването на високотемпературната свръхпроводимост заемаше централно място във физиката на кондензираната материя. Бяха публикувани около 100 хиляди научни статии и това бе едно от най-широкомащабните изследвания в историята на науката изобщо. Така високотемпературните купрати станаха едни от най-добре изследваните материали. Технологията за тяхното получаване бе разработвана и във връзка с производството на силнотоккови кабели, трансформатори, генератори и мощни мотори. Интензивно се изследват техните възможни приложения в бъдещата електроника и генератори на електромагнитни вълни в терахерцовия диапазон. От друга страна механизмът на високотемпературната свръхпроводимост оставаше неизяснен и тази атрактивна интелектуална задача привлече вниманието на много известни теоретици от всички области на физиката.

Цел на настоящата дисертация е да се даде единна картина на теорията на високотемпературните свръхпроводници, като вниманието се фокусира върху тези добре изследвани свойства, които могат да бъдат разбрани в рамките на добре установени модели. Някои теоретични предсказания, като например: инфрачервената прозрачност на бисмутовите купрати, плазмоните в тънки свръхпроводящи филми и определянето на ефективната маса на куперовите двойки, бяха експериментално потвърдени в процеса на многогодишната научно-изследователска работа, чиито основни резултати са представени в настоящата дисертация. Едно от предизвикателствата на теоретичната физика е да се предсказват резултати от експерименти, които никога досега не е правил. В този смисъл експерименталната подкрепа на теоретичните резултати в тази дисертация е важно указание, че се намираме на правилен път.

За постигане на поставените цели в дисертацията са използвани различни методи. За теоретичното описание на високотемпературната свръхпроводимост са приложени стандартните методи на статистическата физика, квантовата теория на полето, теорията на твърдото тяло и теоретичната химия, а като математичен метод е разработен метод за числено сумиране на разходящи редове. И тъй като светът е съставен от атоми, започваме от атомните вълнови функции и в рамките на този базис разглеждаме обменното взаимодействие и електронния спектър. По-нататък решаването на статистическата задача дава аналитични формули за топлинния капацитет и електромагнитния отклик на високотемпературните купрати, а също така и за коефициентите на теорията на Гинзбург–Ландау (ГЛ). На ефектите свързани със статистиката и динамиката на ефективната ГЛ вълнова функция е отделено особено внимание, защото във физиката на високотемпературните свръхпроводници, за разлика от конвенционалните, флукуационните явления са силно изразени и дават забележим дял в кинетичните коефициенти и термодинамичното поведение. Крайната цел на дисертацията е да се опишат нови физични ефекти такива като разпространяването на поляритони в свръхпроводящата фаза, определянето на ефективната маса на носителите чрез стандартните методи на електрониката и да се изследва перспективата за принципно нови приложения на високотемпературните свръхпроводници, като например създаването на генератори на електромагнитни вълни в технически неизползваната досега терахерцова област.

## 2 Описание и организация на дисертационния труд

Дисертацията съдържа 201 страници, 27 фигури, 547 референции, 9 глави и 7 приложения. Тя е построена върху 25 публикации на дисертанта публикувани в достъпни списания и тези работи имат сумарно около 70 цитата; в този брой не са включени работи използвани за кандидатската дисертация. Тъй като дисертацията е достъпна в електронен вид на интернет адрес <http://www.phys.uni-sofia.bg/~mishonov/> в настоящия автореферат ще следваме стила на реферативните списания, които отразяват научната информация от оригиналните трудове без да възпроизвеждат таблици, графики, формули и други технически детайли.

Дисертацията е организирана както следва:

❶ В 1-ва глава е изследвана електрон-зонната структура на свръхпроводящите слоести перовскити. Показано е, че методът на силната връзка, известен в квантовата химия и като метод на линейни комбинации на атомни орбитали (ЛКАО) показани на фиг. 1.1, е адекватно средство за изследване на едночастичния спектър. В секция 1.2 са разгледани слоестите купрати, а в секция 1.3 рутенати. Както е стандартно, за базис са използвани валентните орбитали на металните и кислородни йони. Получени са аналитични формули за електронната дисперсия задаващи връзката между енергията и електронния импулс – уравнения (1.5) и (1.26). Показано е, че тези формули описват добре, както компютерните пресмятания от първи принципи (фигури 1.2 и 1.3) така и експериментите по ъгловоразделителна фотоемисионна спектроскопия (фигури 1.4, 1.5 и 1.6). В приложение А е показано как амплитудите на едноелектронно прескачане между атомите могат да се пресметнат чрез известния от атомната физика метод на асимптотичните вълнови функции. В дискуссионната секция на тази глава се прави извода, че в близките години двукратното различие за ширината на зоната на проводимостта между пресмятанията от първи принципи и ъгловоразделителната спектроскопия е неотстранимо и амплитудите на скок, както и съответните атомни нива трябва да се третират като параметри на ЛКАО теорията, които трябва да бъдат определяни експериментално. Направен е извода, че именно параметрите на модела на силната връзка осъществяват връзка между изчислителната теория и експеримента. Теорията дава адекватните базисни орбитали, а числените стойности на параметрите на силната връзка се определят от сравнението с експеримента. Анализирано е, че теорията описва правилно формата на повърхността на Ферми (контура на Ферми за силно анизотропни перовскити) и е необходимо да се фитира само един параметър свързан с плътността на състоянията на зарядовите носители. В секция 1.5 е предложен нов метод за определяне на логаритмичната производна на плътността на състоянията, който изисква само стандартна електроника, а не уникални ускорители и електронни спектрометри от типа на Scienta 200. Предложеният метод изисква измерване на втората хармоника на отделителната работа, когато през тънък свръхпроводящ филм се пропуска синусоидален ток; виж фиг. 1.7.

❷ Във 2-ра глава е разгледано обменното взаимодействие, като възможен механизъм на свръхпроводящото удвояване във високотемпературните купрати. В секция 2.2 са анализирани както двуелектронния обмен на Хайтлер–Лондон между съседни атоми, така и вътрешноатомния *s-d* обмен на Шубин–Вонсовски–Зинер–Кондо. Особено внимание е отделено на историческата справка за възникването на идеите за електронно удвояване и обмен. В секция 2.3 е изведен редуцирания Хамилтониан на Бардин–Купер–Шрифер (БКШ) и е получено БКШ уравнението за свръхпроводящия процеп (2.25). Обменното

взаимодействие е разгледано в ЛКАО базиса и е показано, че нужната симетрия на свръхпроводящия процеп, която се съгласува с експеримента, се получава единствено при вътрешноатомен обмен с антиферромагнитен знак. В секция 2.4 последователно е изведен сепарабелен модел съответстващ на  $s$ - $d$  взаимодействието представено схематично на фиг. 2.1 и 2.2. Този сепарабелен модел, изведен от първи принципи, съвпада по форма с феноменологично постулираните моделни Хамилтониани специално измислени за описването на наличните експериментални данни. Резултатите от моделни пресмятания с помощта на изведените аналитични формули за електронната дисперсия (1.5), скоростта на зарядовите носители (2.40), свръхпроводящия процеп (2.30) като функции от електронния квазиимпулс са показани на фиг. 2.3. Сравнението на теоретичните пресмятания с фотоемисионните измервания е показано на фиг. 2.3 (d) и е направен извода, че е постигнато едно фундаментално разбиране на механизма на сдвояване във високотемпературните свръхпроводници. В секция 2.5 е анализирано, че необходимия антиферромагнитен знак на обменното взаимодействие е по-скоро правило, както за атомната физика така и за кондензираната материя. В секция 2.6 е съпоставена разработената в дисертацията микроскопска теория за високотемпературната свръхпроводимост с догматиката доминирала тази област в продължение на 15 години. Разгледана е естетиката и фрустрациите на централните догми. Анализирана е периодизацията на Гинзбург за физиката на свръхпроводимостта и е обсъдена възможността епохата “утре” вече да е настъпила. Като най-важен критерий за валидността на различните теоретични модели за високотемпературната свръхпроводимост в приложение В е разгледано обяснението на силната корелация между медното  $4s$  ниво в кристала и температурата на свръхпроводящия преход. Тази корелация, без нужната теоретична интерпретация бе изследвана за почти всички високотемпературни свръхпроводници от групата по електронзонна структура в Макс Планк института в Щутгарт.

③ Решаването на уравнението за свръхпроводящия процеп за сепарабелното  $s$ - $d$  взаимодействие се оказва важно за разбирането на термодинамиката и електродинамиката на всички свръхпроводници с анизотропен просеп. Математичните детайли са подробно описани в приложение С, а в приложение D е дадена програма реализираща известния епсилон алгоритъм. В глава 3 е изведена обща формула за топлинния капацитет (3.29) в случая на сепарабелен редуциран БКШ хамилтониан. Показано е, че този нов микроскопски резултат обхваща като частни случаи всички известни досега формули на Гортер–Казимир, Гинзбург–Ландау, Горьков и Мелик-Бархударов, Покровски и Москаленко. Едновременно с това, по нов начин са изведени БКШ формулите за коефициентите на теорията на Гинзбург–Ландау. Показано е как тези формули се обобщават, когато особеност на Ван Хове се намира в близост до нивото на Ферми (3.33). С помощта на новата формула за топлинния капацитет са фитирани данните за топлинния капацитет на магнезиевия диборит, фиг. 3.3 – един нов некупратен високотемпературен свръхпроводник с фононен механизъм на свръхпроводимостта. За пълнота на проведения анализ е изведена отново формулата за дълбочината на проникване, и е сравнена зависимостта на дълбочината на скинслоя като функция от редуцираната температура за итриев купрат, магнезиев диборит,  $d$ -вълнов свръхпроводник и свръхпроводник с изотропен процеп; фиг. 3.7. Изведените формули са приложени за анализ и на експерименталните данни за стронциевия рутенат и се оказва, че са приложими за фитирането на експерименталните данни за практически всички свръхпроводници. Така за високотемпературните свръхпроводници е повторен анализа за конвенционалните БКШ свръхпроводници и е показано, че

основните термодинамични и електродинамични свойства могат да бъдат изведени от първи принципи. Високотемпературната свръхпроводимост вече не е мистерия и нейната теория може да бъде тривиализирана до това ниво на простота, от което започва окончателното разбиране в науката. Естествено във физиката на високотемпературните свръхпроводници ние намираме цялото богатство на физиката на кондензираната материя. Това се отнася особено за слабо легираните купрати, за които се нарушава трансляционната инвариантност и се наблюдават вълни, на зарядовата и спиновата плътност. Цялостното разбиране на тяхната физика е все още далеч от завършване, но ние считаме, че механизъмът на тяхната свръхпроводимост е общ и е разкрит от анализа на силнолегираните купрати.

④ Глава 4 е посветена на някои нови свойства на електродинамичното поведение на свръхпроводниците и особено на високотемпературните свръхпроводници. В раздел 4.1 е направено предсказване за ново явление – инфрачервената прозрачност на бисмутовите купрати при ниски температури. Поради силната им анизотропия плазмените вълни свързани с движението на куперовите двойки перпендикулярно на равнината мед-кислород имат по-малка честота от свръхпроводящия процеп. При такива условия (4.1) затихването на поляритоните е слабо и те могат да се разпространяват в обема на материала. Това предсказание бе потвърдено впоследствие в много лаборатории в Съединените Щати и Япония и получи международно признание. В същият раздел 4.1 са описани и предсказаните двумерни плазмони в нанотехнологични свръхпроводящи филми. Това предсказание бе също потвърдено от експериментите проведени в Гренобъл, Франция. Раздел 4.2 е специално посветен на въпроса как да се измери ефективната маса на куперовата двойка. Развитието на това направление от физиката на свръхпроводимостта бе задържано с десетилетия от мнението на известни теоретици, че ефективната маса на свръхфлуидните носители е експериментално недостъпен параметър. В раздел 4.2 са предложени няколко възможни метода за създаване на мас-спектроскопия на куперовите двойки. А формулата (4.43) изведена от дисертанта бе използвана при първото определяне на ефективната маса на куперови двойки в лабораториите на Бел Телефон. Показано е, че ефекта на Бернули в свръхпроводниците дава още по-удобен експериментален метод и се прави извода, че без масата на куперовите двойки физиката на свръхпроводимостта би била Хамлет без принца (както се казва в известния английски идиом). Теоретично е анализирано, че всички методи за определяне на масата на куперовата двойка са свързани с ефекти на електричното поле в свръхпроводници. Показано е още, че благодарение на ефекта на Бернули около свръхпроводящите вихри се създава свързан с тяхното движение електричен заряд (4.12).

⑤ За конвенционалните свръхпроводници ролята на флуктуациите на параметъра на подреждане представлява по-скоро академичен интерес. За високотемпературните свръхпроводници обаче, поради малката дължина на кохерентност, флуктуациите играят важна роля и тяхното отчитане е съществено при интерпретацията на много експериментални данни. Глава 5-та е посветена на термодинамиката на Гаусовите флуктуации и флуктуационната свръхпроводимост. В самосъгласувано приближение е пресметната свободната енергия на Гаусовите флуктуации (5.129), а също така следващите от нея общи формули за флуктуационната намагнитеност (5.133) и топлинния капацитет (5.150). Показано е как при аналитично решена задача за двумерен свръхпроводник в перпендикулярно поле може да се получи аналитичното решение за слоест свръхпроводник; общата процедура е илюстрирана с примера на флуктуационната свръхпроводимост,

магнитната възприемчивост и топлинния капацитет (5.58–60). Особено внимание е отделено на тримерния случай, където резултатите за свободната енергия на Гибс (5.178) и флукуационната намагнитеност (5.180) са представени чрез зета-функциите на Хурвиц. При извода на тези резултати е използвана известната от квантовата теория на полето техника на зета-функциите за ултравиолетова регуляризация. Показано е, че разходящите редове трябва първоначално да се сумират с метода на Ойлер-Маклорен, а след това известния епсилон алгоритъм описан в приложение D дава бързо сходящи Паде апроксимации. В секции 5.1 и 5.2 са разгледани случаите на слабо и силно магнитно поле, а в секция 5.4 са предложени няколко нови метода за определяне на параметрите на времезависещата теория на Гинзбург–Ландау (ВЗГЛ). Изведено е, че времеконстантата на тази теория може да се определи чрез отношението на флукуационната проводимост и флукуационната намагнитеност (5.61). С помощта на тази формула за пръв път бе експериментално проверено, че за купратите релаксационните времена са в съответствие с БКШ теорията.

⑥ В глава 6 е разгледана кинетиката и Болцмановото кинетично уравнение на флукуационните куперови двойки. В раздел 6.2 Болцмановото уравнение за флукуационните куперови двойки е изведено в рамките на ВЗГЛ теория. В раздел 6.3, имащ обзорен характер, общата формула за флукуационната проводимост (6.15) е приложена за различни физични условия: високи честоти (6.22), перпендикулярно на слоевете магнитно поле и силно електрично поле. Получени са формули за магнетосъпротивлението (6.36), флукуационния Хол ефект (6.30) и флукуационната проводимост в произволна размерност (6.29), които се съгласуват с получените досега теоретични резултати. Направените нови изводи с помощта на изведеното уравнение на Болцман обаче са значително по-прости, по-ясни и в известен смисъл естетически по-привлекателни. В раздел 6.4 е разгледано самосъгласуваното приближение за редуцираната температура; виж още (5.167) и е отчетено влиянието на електричното поле и енергията на обрязване. В раздел (6.5) е разгледана флукуационната проводимост в нано-нишки, която би могла да бъде изследвана в близко бъдеще, когато технологията за изготвяне на такива структури стане рутинна.

⑦ С развитието на технологиите могат да се изготвят все по-микроскопични структури, за които проблемът с нагряването не е толкова съществен и могат да бъдат прилагани по-силни токове. Глава 7 е специално посветена на ефектите на силно електрично поле изследвани с помощта на уравнението на Болцман. Възпроизведени са отново резултатите на Горьков и тяхното по-късно развитие (7.15). В раздел (7.3) са въведени подходящи за целта безразмерни променливи и с тяхна помощ в раздел 7.4 е разгледана флукуационната проводимост за слоест метал (7.29). Анализирани са и важните частни случаи на много силни електрични полета (7.62) и обратно, на слаби постоянни електрични полета под критичната температура (7.72). В раздел 7.8 е разгледано възможното генериране на 3-та хармоника на напрежението създадена от нелинейните ефекти при силни електрични полета.

⑧ Глава 8 е посветена на едно от най-важните свойства на нормалната фаза на свръхпроводниците – линейния ход на съпротивлението над критичната температура. В ранното развитие на физиката на високотемпературната свръхпроводимост тази линейна зависимост бе посочвана като доказателство на екзотично и неконвенционално поведение и за неприложимост на стандартните теоретични подходи за тези материали. Проведената в глава 8 размерна и моделна оценка показва, че линейният ход на съпро-

тивлението може да бъде обяснен като следствие от силната анизотропия на тези материали и неизбежните в този случай термодинамични флуктуации на електричното поле в диелектричното направление перпендикулярно на проводящите слоеве. С тези флуктуации са свързани и флуктуациите на електронната плътност, така както синият цвят на небето е свързан с флуктуациите на плътността на въздуха. Образно можем да кажем, че съпротивлението има линеен ход защото небето е синьо. Електроните в купратната плоскост се разсейват върху флуктуациите на собствената си плътност. Такъв ефект би бил невъзможен в обемни метали, където електричното поле е силно екранирано.

⑨ Дисертацията е напълно теоретична, но има експериментално ориентирана методология. Целта е да се анализират известни експериментални данни и като критерий за постигнатото разбиране да се предложат нови експерименти, за които резултата е качествено предсказан. За всички други глави от дисертацията имаме добро съответствие с обяснените експерименти и даже няколко успешни предсказания. Не е такъв случаят обаче с 9-та глава, в която се прави екстраполация. В рамките на теорията на флуктуационната свръхпроводимост е предсказано, че за свръхпроводници охладени под постоянно електрично напрежение диференциалната проводимост може да стане отрицателна и това ефективно отрицателно триене може да се използва за създаване на принципно нови генератори на електромагнитни вълни в терагерцовата област. Засега теорията на терагерцовите осцилации генерирани чрез преохладени свръхпроводници е само една теоретична идея. В тази хипотеза, изказана в 9-та глава, дисертантът вярва оптимистично така, както след 8 слънчеви дни престава да носи чадър със себе си.

### 3 Общи изводи за високотемпературните свръхпроводници

След 20 годишни всестранны изследвания бе надеждно проверено, че няма други перовските със сравнима критична температура. Каквито и химични замествания да бяха извършвани не бе синтезиран друг високотемпературен перовскит, а междуременно откритите фононни свръхпроводници имат критична температура сравнима с критичната температура на началните образци на Беднорц и Мюлер. Постепенно възникна един допълнителен проблем: с какво е уникална купратната равнина  $\text{CuO}_2$  за създаването на свръхпроводимост, така че за 20 години не бе създадено нищо сравнимо. Като правило всички модели на високотемпературната свръхпроводимост използват твърде общи свойства и система от понятия, които могат да се реализират за много физични системи.

В рамките на разработената в дисертацията теория, изключителността на равнината  $\text{CuO}_2$  намира естествено обяснение: сдвояването се създава от  $4s-3d$  взаимодействието локализирано в медните йони, но за да имаме максимална  $s-d$  хибридизация на зоната на проводимостта е необходимо тези медни орбитали да са значително хибридизирани с кислородните  $2p$  орбитали. В този смисъл уникалността на  $\text{CuO}_2$  равнината се причинява от едно тройно съвпадение: ако прегледаме цялата таблица на елементите ще забележим, че за медта и кислорода тези три нива  $3d$ ,  $4s$ ,  $2p$  са най-близки. Даже само за купратите, положението на  $4s$  нивото ярко корелира с критичната температура. Тази корелация лесно се пресмята в рамките на предложениия  $s-d$  модел, а остава неразбираема в рамките на всички останали теоретични модели. Затова заглавието на кратката версия на теорията на високотемпературната свръхпроводимост в свободен превод е:

"От- $3d$ -до- $4s$ -през- $2p$  високия път към свръхпроводимостта".

За два химични елемента три нива могат да бъдат най-близки, но извън тази оптимизация всички останали свойства на високотемпературните свръхпроводници могат да бъдат разбрани в рамките на стандартни теоретични подходи и цялостния анализ проведен в дисертацията показва, че ние сме близо до една победа на традиционализма, както се случи преди около половин век в квантовата електродинамика. Разбира се все още теорията на високотемпературната свръхпроводимост е жива наука и много от разглежданията още не са за музея, но въпреки това дисертантът счита, че повечето от постановките няма да бъдат качествено преразгледани.

## 4 Основни приноси

При самото описание на дисертационния труд много от приносите бяха споменати. По-надолу са систематизирани основните приноси, които са научна новост и се предлагат за защита.

1. В рамките на модела на линейните комбинации на атомните орбитали (ЛКАО) са изведени аналитични формули за зонната структура, които описват контурите с постоянна енергия в импулсното пространство, повърхността на Ферми, груповата скорост на зарядовите носители, и неявно енергията като функция от импулса. Тези резултати описват добре данните на ъглово разделителната фотоемисионна спектроскопия. Изведените зонни вълнови функции са основа за по-нататъшното отчитане на ефектите свързани с взаимодействието.
2. Предлага се двуелектронното  $s$ - $d$  обменно взаимодействие да бъде разглеждано като търсеният от 20 години механизъм на високотемпературната свръхпроводимост. Показано е, че едно и също  $s$ - $d$  взаимодействие може да създава, както свръхпроводимостта на купратите така и феромагнетизма на желязото и ние може да сме свидетели на едно забележително обединение. Показано е, че основните свойства на свръхпроводимостта на силнолегираните купрати, такива като анизотропията на свръхпроводящия процеп и корелацията между критичната температура и медното  $4s$  ниво могат да бъдат обяснени като следствие на  $s$ - $d$  взаимодействието включено в стандартната БКШ теория. В този смисъл е показано, че високотемпературната свръхпроводимост не е мистерия, а може да бъде разбрана в рамките на методи изложени в учебниците и нейната теория за силнолегирания случай е тривиализирана. Дълги години този принос ще има дискуссионен характер, защото отделни свойства (не цялостната картина) имат алтернативни обяснения, които се поддържат от техните активно работещи в тази област автори.
3. Показано е, че общите формули изведени за  $s$ - $d$  модела на високотемпературните свръхпроводници са приложими практически за всички известни свръхпроводници. Показано е, че изведените формули за топлинния капацитет, уравнението за температурната зависимост на параметъра на подреждане и коефициентите на теорията на Гинзбург–Ландау са в съответствие с известните резултати на Покровски, Горков и Москаленко за анизотропни свръхпроводници получени в БКШ епохата. Новите изводи дават някои технически преимущества – резултатите могат лесно да се обобщят за случая на Ван Хове особености на плътността на състоянията.

4. Предсказано е съществуването на двумерни плазмони разпространяващи се в тънки свръхпроводящи филми; тяхното съществуване бе експериментално потвърдено.
5. Предсказано е ново явление: инфрачервена прозрачност на бисмутовия купрат ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ). В обема на свръхпроводника могат да се разпространяват плазмони с честота по-малка от свръхпроводящия процеп. Това предсказание бе експериментално потвърдено и получи признание в много лаборатории в Съединените Щати и Япония.
6. В много учебници ефективната маса на куперовите двойки бе обявена за експериментално недостъпен параметър. Показано е как ефективната маса на куперовите двойки може да бъде експериментално определена от данните за електростатично модулиране на кинетичната индуктивност на тънки купратни филми. Изведената формула бе използвана в лабораториите на Бел Телефон при първото определяне на този важен за физиката на свръхпроводимостта параметър. Предложена е модификация на този експеримент – мас-спекроскопия на куперовите двойки базирана на ефекта на Бернули.
7. Изведени са флукуационните поправки към свободната енергия, намагнитеността и топлинния капацитет за двумерни и слоеви свръхпроводници в перпендикулярно магнитно поле, а също така и за анизотропни обемни свръхпроводници.
8. В рамките на зависещата от времето теория на Гинзбург–Ландау е изведено Болцмановото кинетично уравнение описващо кинетиката на флукуационните куперови двойки.
9. Чрез решаване на Болцмановото кинетично уравнение е изведена формула за флукуационния ток за силни електрични полета, която допълва известния резултат на Горков получен директно в БКШ теорията.
10. Предложен е метод за определяне на времеконстантата на теорията на Гинзбург–Ландау чрез експериментално измерени флукуационна проводимост и магнитна възприемчивост. Резултатите от прилагането на метода показаха, че в рамките на експерименталната неопределеност времеконстантата е в съответствие с пресмятанията в рамките на БКШ теорията и в този смисъл високотемпературните купрати показват конвенционално поведение.
11. Изказана е хипотеза, че линейния ход на температурната зависимост на съпротивлението, наблюдаван за някои слоеви купрати може да бъде свързан с термодинамични флукуации на електричното поле в диелектричното направление и свързаните с тях флукуации на електронната плътност.
12. Изказана е хипотеза, че за свръхпроводници преохладени под критичната температура във външно електрично поле може да се наблюдава отрицателна диференциална проводимост. Тази отрицателна диференциална проводимост би могла да се използва за създаване на нов тип генератори на електромагнитни вълни в тера-херцовата област.

Дисертационния труд е обсъден и насрочен за защита на разширен катедрен съвет на катедра Теоретична физика при Физически факултет на СУ Св. Кл. Охридски, състоял се на 18 юни 2007 г. Авторът е доцент към същата катедра.

## Литература

- [1] T. Mishonov and M. Stoev, Determination of density of states of high- $T_c$  films by FET type microstructures, cond-mat/0612169; Eur. Phys. J. B **54** (2006) 419–421.
- [2] T.M. Mishonov and M.T. Mishonov, Theory of terahertz electric oscillations by supercooled superconductors, Supercond. Sci. Technol. **18** (2005) 1506–1512; cond-mat/0505696.
- [3] T. M. Mishonov, S. I. Klenov and E. S. Penev, Temperature dependence of specific heat for anisotropic-gap BCS superconductors, Phys. Rev. B **71** (2005) 024520, cond-mat/0212491 (2002).
- [4] T. M. Mishonov, G. V. Pachov, I. N. Genchev, L. A. Atanasova and D. C. Damianov, Kinetics and Boltzmann kinetic equation for fluctuation Cooper pairs, Phys. Rev. B **68** (2003) 054525; cond-mat/0302046; (original first manuscript: T. M. Mishonov and D. Ch. Damianov, Fluctuation conductivity of superconductors within the framework of time-dependent Ginzburg-Landau theory, Submitted to Phys. Rev. B (1996) Ms. Code: Bu 5876). [цитати: 1]
- [5] T. Mishonov and E. Penev, Bernoulli potential, Hall constant, and Cooper pair effective masses in disordered BCS superconductors, Int. J. Mod. Phys. B **17** (2003) 2883–2895; cond-mat/0302168. [цитати: 1]
- [6] T. Mishonov, S.-L. Drechsler and E. Penev, Influence of the Van Hove singularity on the specific heat jump in BCS superconductors, Mod. Phys. Lett. B **17** (2003) 755–762 ; cond-mat/0209192. [цитати: 5]
- [7] T. M. Mishonov, J. O. Indekeu and E. S. Penev, Superconductivity of overdoped cuprates: the modern face of the ancestral two-electron exchange, J. Phys.: Condens. Matter **15** (2003) 4429–4456; cond-mat/0209191. [цитати: 3]
- [8] T. M. Mishonov, J. O. Indekeu and E. S. Penev, The  $3d$ -to- $4s$ -by- $2p$  highway to superconductivity in cuprates, Int. J. Mod. Phys. B **16** (2002) 4577–4585; cond-mat/0206350. [цитати: 1]
- [9] T. M. Mishonov, J. P. Wallington, E. S. Penev and J. O. Indekeu, Reduced pairing Hamiltonian for interatomic two-electron exchange in layered cuprates, Mod. Phys. Lett. B **16** (2002) 693–699; cond-mat/0205616. [цитати: 3]
- [10] T. Mishonov and E. Penev, Thermodynamics of anisotropic-gap and multiband clean BCS superconductors, Int. J. Mod. Phys. B **16** (2002) 3573–3586; cond-mat/0206118. [цитати: 14]
- [11] T. M. Mishonov, E. S. Penev and J. O. Indekeu, Comment on “Anisotropic  $s$ -wave superconductivity in  $MgB_2$ ” [S. Haas and K. Maki, cond-mat/0104207; Phys. Rev. B **65** (2001) 020502(R)], Phys. Rev. B **66** (2002) 066501; cond-mat/0204545. [цитати: 5]

- [12] T. M. Mishonov, E. S. Penev and J. O. Indekeu, Comment on “Anisotropic s-wave superconductivity: comparison with experiments on MgB<sub>2</sub>” [A. I. Posazhennikova, T. Dahm and K. Maki, cond-mat/0204545; Europhys. Lett. **60** (2002) 134], Europhys. Lett. **61** (2003) 577–578; cond-mat/0205104. [цитати: 2]
- [13] T. Mishonov, A. Posazhennikova, J. Indekeu, Fluctuation conductivity in superconductors in strong electric fields, Phys. Rev. B **65** (2002) 064519; cond-mat/0106168. [цитати: 14]
- [14] T. M. Mishonov and E. S. Penev, Thermodynamics of Gaussian fluctuations and paraconductivity in layered superconductors, Int. J. Mod. Phys. B **14** (2000) 3831–3879; cond-mat/0004023. [цитати: 21]
- [15] T. M. Mishonov and E. S. Penev, Tight-binding modelling of band structure of layered superconducting perovskites, J. Phys.: Condens. Matter **12** (2000) 143–159; cond-mat/0001049. [цитати: 10]
- [16] T. M. Mishonov and M. T. Mishonov, Simple model for linear temperature dependence of the electrical resistivity of layered cuprates, Physica A **278** (2000) 553–562; cond-mat/0001031. [цитати: 1]
- [17] T. M. Mishonov and N. I. Zahariev, Predicted new electrodynamic effect for thin films of layered cuprates - surface Hall currents induced by electric induction  $D_{\perp\text{film}}$ , Superlat. Microstruct. **26** (1999) 57–60. [цитати: 4]
- [18] T. Mishonov, Theory of Cooper-pair mass spectroscopy by current-induced contact potential difference, Phys. Rev. B **50** (1994) 4009. [цитати: 8]
- [19] T. Mishonov, Technique for measuring the Cooper pair velocity, density and mass using Doppler splitting of plasmons in low-dimensional superconducting structures, Phys. Rev. B **50** (1994) 4004. [цитати: 17]
- [20] T. Mishonov, Comment on “Metallic and Superconducting Surfaces of YBaCuO Probed by Electrostatic Charge modulation”, Phys. Rev. Lett. **67** (1991) 3195. [цитати: 10]
- [21] T. Mishonov, Predicted Plasma Oscillations in the Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> High-Temperature Superconductor, Phys. Rev. B **44** (1991) 12033. [цитати: 31]
- [22] T. Mishonov, Acoustic Phonon Emission by Two-Dimensional Plasmons, Phys. Rev. B **43** (1991) 7787. [цитати: 3]
- [23] T. Mishonov, Magnetoplasma waves in thin high temperature superconducting layers, Phys. Rev. B **42** (1990) 6715. [цитати: 1]
- [24] T. Mishonov and A. Groshev, Plasmon Excitations in Josephson Arrays and Thin Superconducting Layers, Phys. Rev. Lett. **64** (1990) 2199. [цитати: 15]
- [25] Tz. Sariisky and T. Mishonov, New plasma waves and soft modes in narrow gap inversion layers, J. Physique Lettres **42** (1981) L1503.

## Благодарности и ретроспекция

Моята работа над проблема за високотемпературната свръхпроводимост (ВТСП) отне повече от четвърт век и много хора допринесоха за атмосферата и успеха на това изследване. Началото бе положено през 1979 г. от неформалния семинар, който организирахме със Цветан Сарийски в една барака край Сточна гара; в тази ранна епоха в университетите се говореше, че свръхпроводимостта е “изяден хляб”, а лидерът на идеята за ВТСП, В. Л. Гинзбург, беше смятан за поддръжник на остаряла идея. Още на този семинар бяха обсъдени всички основни понятия, които щяха да се окажат много важни при по-нататъшното развитие на тази област, а именно: методите на квантовата теория на полето, теорията на диелектричното екраниране, обменното взаимодействие, важността на двумерните и слоести системи, плазмените вълни в нискоразмерни системи и др. Към семинара се присъедини и Атанас Грошев, тогава гимназист, а експерименталното потвърждение на предсказанията от нас плазмони в тънки свръхпроводящи филми бе един забележителен успех на духа, който не се съобразява с условията. В тези времена Иван Захариев бе нашият незаменим ментор в теоретичната физика. За “биополето” на тази ранна епоха допринесе много и Тихомир Христов, чието съавторство и чувство за хумор бяха неопценими. В различни години работата ми с бившите студенти и ученици: Д. Дамянов, И. Генчев, Я. Манева, М. Мишонов, М. Стоев, Р. Колева, Р. Данев, А. Пачов, Н. Захариев и много други бе непрекъснат извор на вдъхновение, оптимизъм и добро настроение. Идея от лекционния материал се превръщаше в дипломна работа представена на конференция, а после се превръщаше в установен факт цитиран в обзорите. На бившите си студенти съм благодарен и за приятелската помощ при критичното прочитане на ръкописа на дисертацията в последните дни преди завършването. Най-съществен принос обаче за завършването на този труд има Евгени Пенев, който е съавтор на значителен брой от работите, върху които е построена дисертацията. Нашето многогодишно неформално сътрудничество е едно от най-плодотворните в научно отношение и аз съм му изключително признателен за това. През всичките тези години помощта на В. Мишонова бе неопценима, както при проверка на аналитични резултати за изведени формули така и при подготовката на ръкописи; тя бе верен помощник в трудни моменти. Поради ограничения обем не мога да спомена още много хора, на които съм признателен, което не омаловажава тяхната съпричастност. Специални благодарности изказвам на всички свои колеги от цял свят, активно работещи в тази област, с които съм имал стимулиращи дискусии върху предмета и резултатите на тази дисертация. Голяма част от настоящето изследване беше осъществена благодарение на подкрепата на проф. Дж. Индекю и аз съм много признателен за приятелската гостоприемност по време на дългогодишното ни сътрудничество в Льовен и за неговия интерес към моята научна работа. Признателен съм и на проф. Н. Плакида, ОИЯИ - Дубна, за неговото гостоприемство. Особени благодарности дисертантът изказва и на Проф. М. Матеев за постоянната помощ, подкрепа и разбиране през тези дълги години на разработване на теорията на ВТСП; помощта му в критични моменти бе жизнено важна положените усилия да не отидат за озеленяването на Сахара.