

ผลทางไอโซโทปในตัวนำยิ่งยวดอุณหภูมิวิกฤตสูง

นายสุภาพ พวงสุวรรณ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคำหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2535

ISBN 974-581-648-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

018673

117204306

ISOTOPE EFFECT IN HIGH CRITICAL TEMPERATURE
SUPERCONDUCTORS

Mr. Supap Puangsuwan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science

Department of Physics

Graduate School

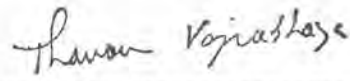
Chulalongkorn University

1992

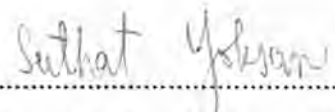
ISBN 974-581-648-5


Thesis Title Isotope Effect in High Critical Temperature Superconductors
By Mr. Supap Puangsuwan
Department Physics
Thesis Advisor Professor Virulh Sa-yakanit, F.D.

Accepted by the Graduate School, Chulalongkorn University in Partial
Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science.

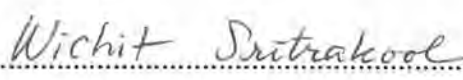

..... Dean of Graduate School
(Professor Thavorn Vajarabhaya, Ph.D.)

Thesis Committee


..... Chairman
(Professor Suthat Yoksan, Ph.D.)


..... Thesis Advisor
(Professor Virulh Sa-yakanit, F.D.)


..... Member
(Associate Professor Kitt Visoottiviseth, Ph.D.)


..... Member
(Associate Professor Wichit Srirakool, Ph.D.)

พิมพ์ต้นฉบับบทความวิจัยฉบับสมบูรณ์ในกรอบสี่เหลี่ยมเพียงม้วนเดียว



นายสุภาพ พวงสุวรรณ : ผลทางไอโซโทปในสารตัวนำยิ่งยวดอุณหภูมิวิกฤตสูง

(ISOTOPE EFFECT IN HIGH CRITICAL TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ศ.ดร. วิรุฬห์ สายคณิต 84 หน้า ISBN 974-581-648-5

การศึกษาปรากฏการณ์ไอโซโทปออกซิเจนในสารตัวนำยิ่งยวดอุณหภูมิวิกฤตสูงพบว่าตัวชี้กำลังไอโซโทปมีค่าน้อยมาก ปรากฏการณ์ไอโซโทปที่เกือบจะไม่ปรากฏนี้ยังผลให้มีข้อสงสัยว่าการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอน ไม่ใช่สิ่งที่ทำให้เกิดสภาวะตัวนำยิ่งยวดในสารตัวนำยิ่งยวดอุณหภูมิวิกฤตสูง

ปัญหานี้พบฉบับนี้ได้ นำข้อเท็จจริงคู่สำหรับอันตรกิริยาคู และความหนาแน่นสถานะอิเล็กตรอนแบบแวนโฮปไปใช้ในทฤษฎีบีซีเอส ตัวชี้กำลังไอโซโทปได้ถูกแก้ไขที่อุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นและตัวชี้กำลังไอโซโทปเป็นศูนย์ ปรากฏการณ์ไอโซโทปออกซิเจนก็หายไป พบว่ามีสัมพันธ์อย่างแรงระหว่างค่าอุณหภูมิวิกฤตกับอันตรกิริยาคูควาระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอน ที่อุณหภูมิวิกฤตสูงซึ่งปรากฏการณ์ไอโซโทปออกซิเจนเกือบหายไป พบว่าค่าความแรงของอันตรกิริยาคูควาระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอนจะมีค่าน้อยซึ่งขัดกับที่อุณหภูมิวิกฤตต่ำอย่างมาก ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอนยังมีผลต่อการเกิดสภาวะตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิวิกฤตสูง แต่อาจนำเอาอันตรกิริยาแบบอื่นรวมเข้ามาด้วย

ตัวชี้กำลังไอโซโทปของสารตัวนำยิ่งยวดออกไซด์ที่ทราบ ทำให้เราสามารถแบ่งสารตัวนำยิ่งยวดอุณหภูมิสูงออกได้เป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มของสารประกอบแลนทานัม กลุ่มที่สองซึ่งมีสารประกอบของอิตเทรียม เทลเลียม และบิส്മัท แบบจำลองของเรายังได้คำนวณหาค่าช่วงพิสัยที่แน่ชัดของค่าความแรงของอันตรกิริยาคูควาระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอน ซึ่งสนับสนุนการแบ่งกลุ่มสองกลุ่มนี้ด้วย

ภาควิชา ฟิสิกส์
สาขาวิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2534

ลายมือชื่อนิติ สุภาพ พวงสุวรรณ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

SUPAP PUANGSUWAN : ISOTOPE EFFECT IN HIGH CRITICAL TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS.

THESIS ADVISOR : PROF. VIRULH SA-YAKANIT, F.D. 84 pp. ISBN 974-581-648-5.

The oxygen isotope effect is studied in the high- T_c superconductors. It is found that the isotope effect exponent α is almost zero. This nearly absent oxygen isotope effect seems to suggest that the conventional electron-phonon interaction cannot play a key role in high- T_c superconductivity.

In this thesis, we introduce a double-square well potential for the pairing interaction and include a logarithmic van Hove singularity in the density of states within the framework of the BCS theory. The isotope effect exponent α is modified. At higher critical temperatures α goes to zero, and the isotope effect vanishes. We find a strong correlation between the transition temperature and the electron-phonon coupling interaction. At high- T_c where the oxygen isotope effect is nearly absent, the electron-phonon coupling interaction is found to be small, in contrast to being quite large at low- T_c . Our results suggest that the phonon coupling mechanism still plays a role in the high- T_c superconductors, but it may be supplemented by other purely electronic mechanisms.

Together with the known isotope effect exponent for the oxide superconductors, we can consider these high- T_c superconductors in two groups, firstly the La-Sr-Cu-O group and secondly in Y-Ba-Cu-O, Bi-based and Tl-based groups. Our calculations also give a distinct range for the values of the electron-phonon coupling interaction supporting the existence of each group.

ภาควิชา.....ฟิสิกส์
สาขาวิชา.....ฟิสิกส์
ปีการศึกษา.....2534

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

ACKNOWLEDGMENTS

The author wishes to express his deep gratitude to his supervisor, Prof. Virulh Sa-yakanit for his invaluable advice, guidance and encouragement given throughout this work. Thanks are also due to Assoc. Prof. Jong-orn Berananda, Assoc. Prof. Wichit Sritrakool and Assoc. Prof. Payong Tansiri for their help in various ways.

It goes without saying to the thesis committee, Assoc. Prof. Kitt Visoottiviseth, Prof. Sutat Yoksan and Assoc. Prof. Wichit Sritrakool for their reading and criticizing the manuscript. Special thanks are due to Mr. Montri Sukdananda and Mr. Peerapol Prasertsil for their assistance in typing a part of this thesis.

Last but not least, he would like to express his sincere thanks to Dr. Julian Poulter for his help in the numerical calculation and assistance in correcting the English manuscript including informative discussions.

TABLE OF CONTENTS

	Page
ABSTRACT IN ENGLISH	iv
ABSTRACT IN THAI	v
ACKNOWLEDGMENTS	vi
LIST OF FIGURES	ix
LIST OF TABLES	xii
CHAPTER I INTRODUCTION	1
Preliminary	1
Outline of Thesis	2
CHAPTER II THE HISTORY OF SUPERCONDUCTIVITY	3
The Era of Discovery	3
Search for Higher Transition Temperature	
Superconductors	6
The Breakthrough of the New Copper Oxide	
Superconductors	7
Theoretical Survey	9
The London Theory	10
The Ginzburg-Landau Theory	12
The BCS Theory	13
CHAPTER III STRUCTURE AND PHASE DIAGRAM OF	
OXIDE SUPERCONDUCTORS	16

	Structure of La-M-Cu-O systems	16
	Structure of Y-Ba-Cu-O systems	20
	Bismuth-Containing Superconductors	24
	Thallium-Containing Superconductors	25
	Phase Diagram	27
CHAPTER IV	ISOTOPE EFFECT IN SUPERCONDUCTORS	31
	Introduction	31
	Isotope effect and Lattice Properties in Superconductivity ..	33
	BCS Theory and Isotope Effect	35
	Strong-coupling Theory and the Isotope Exponent in Conventional Superconductors	39
	Isotope Effect in High Temperature Superconductors	46
	The Oxygen Isotope Effect and Apex Anharmonicity	48
	The Importance of Some Electronic Interaction for the Isotope Effect in Higher Critical Temperature Superconductors	51
CHAPTER V	ISOTOPE EFFECT AND VAN HOVE SINGULARITY IN HIGH - T_c SUPERCONDUCTORS	56
CHAPTER VI	DISCUSSION AND CONCLUSION	73
REFERENCES	75
CURRICULUM VITAE	83

LIST OF FIGURES

	Page
Fig. 1 Resistance in ohms of a specimen of mercury versus absolute temperature. This plot by Kammerlingh Onnes marked the discovery of superconductivity	3
Fig. 2 The Meissner effect , a superconductivity in the magnetic field	4
Fig. 3 The magnetization curves of type I (3a), and type II (3b)	5
Fig. 4 The period of the search for superconductors, the conventional and also high temperaturesuperconductors	9
Fig. 5 Schematic diagram of variation of $\Psi(x)$ and $h(x)$. For type I and type II superconductors	13
Fig. 6 The K_2NiF_4 perovskite structure and the body-centered tetragonal structure of $La_{2-x}M_xCuO_{4-y}$	17
Fig. 7 General view of the highly two-dimensional tetragonal $La_{2-x}M_xCuO_{4-y}$ structure, the CuO_6 octrahedra and the ninefold of Sr and La coordinations. The La and Sr atoms, large shaded circles; Cu atoms, small filled circles. Oxygen atoms at vertices of polyhedra: O(2) atoms are at vertices within the Cu-O planes (perpendicular to c), O(2) atoms at the vertices between these planes	18

Fig. 8 The ABO_3 perovskite structure(8a), and the stack of three perovskite cell (8b)	21
Fig. 9 The structure of $YBa_2Cu_3O_{7.8}$, the coordination of copper with oxygen is emphasized to show the location of copper-oxygen planes and chains	22
Fig. 10 Nominal unit cells for the bismuth- and thallium-containing superconductors : (a) $Tl_1Ba_2Cu_1O_5$, (b) $Tl_1Ca_1Ba_2Cu_2O_7$, (c) $Tl_1Ca_2Ba_2Cu_3O_9$, (d) $Tl_2Ba_2Cu_1O_6$, (e) $Tl_2Ca_1Ba_2Cu_2O_8$, (f) $Tl_2Ca_2Ba_2Cu_3O_{10}$. Only the 2021, 2122, and 2223 structures form in the Bi-based system, whereas all six structures form in the Tl-based system.....	26
Fig. 11 Schematic phase diagram for $La_{2-x}Ba_xCuO_{4-y}$	29
Fig. 12 Schematic phase diagram for $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ based on experimental data ..	30
Fig. 13 Current in the Helmholtz coils at the critical field vs. the absolute temperature	31
Fig. 14 Plot of $\log T_c$ vs. $\log M$ for mercury	33
Fig. 15 The plotted of α with T_c (workout from Morel and Anderson formulation)	39
Fig. 16 The logarithm of θ_D versus $(1 + \lambda) / \lambda$ from a solution of the integral equation of the strong coupling theory for $\mu^* = 0$ (a) and the quantity y	

	define as $y = 1 + (\langle \omega \rangle / \omega_0) \lambda$ versus λ (b)	44
Fig. 17	Isotope effect coefficient α as a function of λ obtained from the McMillan equation for the three values of μ^* ($\mu^* = 0.1$, solid curve; $\mu^* = 0.13$ dotted curve; and $\mu^* = 0.2$, dashed curve)	45
Fig. 18	The plot of α against T_c within the strong-coupling formulation	46
Fig. 19	The plot of α versus t_c , from Daemen and Overhauser work.....	55
Fig. 20	The α and T_c are plot as function of λ	66
Fig. 21	The curves for σ and λ as the function of temperature	69
Fig. 22	Isotope effect exponent α for simple and transition metals with ranges shown for α and $\log(T_c / 2)$	70
Fig. 23	Isotope effect exponent α for the oxide superconductors with ranges shown for α and $\log(T_c / 2)$	71

LIST OF TABLES

	Page
Table 1. Bond lengths and angles in the copper-oxygen polyhedron and metal-oxygen bond in $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$	19
Table 2. Selected bond lengths(\AA) and angles (\AA) in orthorhombic $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	23
Table 3. Transition temperatures for mercury isotops	32
Table 4. Isotope massed and the transition temperature for Hg and Sn	33
Table 5. Possible theoretical relations of the form $M^\alpha T_c = \text{constant}$	34
Table 6. Isotope effect in superconductors experiment value of α in $M^\alpha T_c = \text{constant}$, where M is the isotopic mass	36
Table 7. The Debye temperature and the critical temperature are taken from the "American Institute of Physics Handbook, " Mc Graw- Hill, 1957. $N(0)V$ is estimated from the critical temperature with the help of BCS equation. The exponent of the isotope effect (last column) is derived from this experimental value of $N(0)V$ with the help of relation (4.7)	38

Table 8.	Values of the coupling constant λ for various values of the Coulomb terms μ^* and transition temperature T_c (K)	44
Table 9.	Evaluation of the apex oxygen to the total oxygen ions ratio	49
Table 10.	Measured oxygen isotope shifts for O^{18} substitution for O^{16} , δT_c calculated oxygen isotope shift exponent using Eq. (4.22) and the apex oxygen shift α using Eq. (4.23)	51
Table 11.	Empirical values of the electron-phonon coupling constant of $Ba_{1-x}K_xBiO_3$ ($0.37 < x < 0.5$), $La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$, $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$, and $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ found from the isotope effect exponent α , and T_c using Eq. (5.44).....	67
Table 12.	Empirical values of the electron-phonon coupling constant of $La_{2-x}Sr_xCuO_4$, $YBa_{2-x}La_xCu_3O_z$ ($z \cong 7$) and $(Y_{1-x}Pr_x)Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ found from the isotope effect exponent α and T_c using Eq. (5.44) ...	68
Table 13.	The λ values for each group of the 30-K and the above 90-K oxide superconductors	72