研 究

新体系物理学により提案された高温超電導発生機構の

易しい解説と実験的研究第一報

帝京大学薬学部物理学教室 飯田修一*、光井俊治、阿部清、松原直美**

Shuichi Iida, Toshiharu Mitsui, Kiyoshi Abe and Naomi Matsubara: An Easily Understandable Explanation of the Possible Enhancement Mechanism of the High Temperature Superconductivity of Oxides Proposed by the New Frames in Physics and the First Report of Our Experimental Studies on BiPbSrCaCu-O System.

Since the new frames in physics present a divergenceless mathematical framework for the interaction between the electron fields and the zero-point photon fields, they provide a powerful tool for the analysis of the mechanism of the superconductivity. The minimal coupling effective Hamiltonian predicts that the interaction of a single electron field with a normal-mode of the photon can raise its amplitude by a magnitude of more than 10^{-7} , so that, by the participation of the superconductive electron fields of more than 10^7 in the number, and, under the action of the proposed possible Q enhancement of the mesoscopic in-crystal resonator, a good possibility is present that a unified complex of the electron fields and the zero-point photon fields is cooperatively created in the specimen. Since this mechanism is spin-independent and has no direct relation to the phonon modes, no isotope effect nor serious effect from the magnetic ions is expected. Different from metals, since the oxides have the ionic lattice which is more rigid and more difficult to be excited by the photon fields, the coupling between the resultant electron-photon field complex and the thermal modes of the phonon fields of the lattice should be much smaller.

(Received June 18,1988)

YBa₂Cu₃O₇ に 90K クラスの高温超電導が発見され、更にBi₂Sr₂Ca₂Cu₃-O系、Tl₂Ba₂Ca₂Cu₃-O系など多くの類似相結晶に 120K クラス超電導の存在が報告されて、超電導発現機構の常識が一新される状況が進展している。ところで、従来の BCS 理論は、局所的な格子振動 (Phonon) を媒介として、超電導電子間に協力的相互作用が発生し、クーパー・ペアとエネルギー・ギャップが形成される事を骨子とする。その結果、その臨界温度 T_c が格子振動の担い手である陽イオン原子の質量に依存し、同位元素効果が期待され、金属超電導体に関してその実測値との一致を見ている。ところが、酸化物超電導体では、此の同位元素効果が殆ど無い。更に全ての超電導体物質の同位元素効果を図表にすると、それは T_c の上昇と共に減少し零を切るという報告がある。従って単純な BCS 理論の延長上に無い。又金属超電導体と異なり、磁性イオンの添加効果も小さく、超電導と反強磁性の共存も確認されている。更に不純物効果も小さく、酸素イオンの不規則配列の存在など、一旦超電導相が形成されると、超電導は構造敏感量では無いように見える。さて、電子のVRモデル (Vortex Ring, 永久電流環) を重要な基礎として、新体系物理学が建設され、従来漠然としか理解されていなかった古典物理学と量子物理学の数理解析的連結構造が、厳密な数学体系で明示された。その結果、VRモデルを使用し、相対論的最小作用の原理によって古典物理的に導出された c-数方程式及び c-数解の全集団は、簡単な q-数化の手続き ($\mathbf{p} \rightarrow (\hbar/i)\nabla$, $E \rightarrow (-\hbar/i)\partial/\partial t$ 、スピン角運動量テンソル $S^{\mu\nu} = \hbar(\gamma^\mu\gamma^\nu - \gamma^\nu\gamma^\mu)/4i$ など [γ はディラックの γ -マトリックス]) で、q-数方程式及び q-数解の量子物理学体系に移行する。q-数方程式と q-数解は何れも演算子 (operator) なので、それにより演算される状態関数が付加されて、量子物理学の全体系が形成される。従来と異なり、電子の c-数像が有限の大きさ

* (東京大学名誉教授)、** 薬学部学生

(半径 $\circ R = g\hbar/mc = 0.00773185 \text{ \AA}$) を持ち、スピン角運動量と磁気能率を自蔵し、電磁自己エネルギー無限大の、いわゆる発散の困難が無く、従って、量子物理学の最深部に関係する物理学の問題が、従来より格段に進歩した観点から解析できる。先ず q -数体系、即ち量子物理学体系中の電子を示すものは、シュレディンガー・ディラック流の波動関数そのものであって、点とか、永久電流環 (VR電子) は c -数体系中でのみ意義を持ち、一旦 q -数化されると、具体性が消えることが明瞭となった。この波動関数そのもので示された電子を「電子場」(Electron Field) と呼び、ボルン流の統計確率波の考え方は、電子場が微視的な範囲に広がっている限り強調されない。これが、電子に対して新物理学が導入した重要な概念の改革である。さて、既に量子電磁力学は、絶対零度でも、真空が零点エネルギー状態で揺動する電磁輻射場、「光子場」、で充ち充ちていることを導出しているが、この光子場と電子場の相互作用効果が、従来の物理学と異なり、新体系物理学では発散の困難なく解析できる事になった。その結果電子の静止エネルギー mc^2 は、光子場との相互作用により、 10^{-6} の桁だけ小さくなることが導出された¹⁾。このことは電子質量の測定値と理論値との間に補正量の存在を示して居り、電子の異常磁気能率の第二次補正項 (VR電子は c -数段階で $\alpha/2\pi$ の第一次補正項を正確に持っている¹⁾) が説明される。これは新体系物理学による解析が、従来の量子電磁力学 (Q. E. D.) の解析結果と相反せず、両立することを示す一つの事実である。このとき用いた電子場と光子場の相互作用の解析方法は、原子やイオンが電磁波を吸収したり、電磁波を発射したりする際の従来の解析方法と²⁾ 形式的には同等であり、従って、超電導体の内部で、電子場と光子場が相互作用する際に使用できると推定される。ところで、超電導体が絡む電子場と光子場との相互作用の重要な実験測定例として、西独マックス・プランク研究所のSchleichとWaltherによる単一原子からのマイクロ波の自発輻射実験がある³⁾。Rb⁸⁵ の $63p_{3/2} \rightarrow 61d_{3/2}$ の遷移に伴う輻射であるが、単一原子を超電導体Nbで作られた共振空洞中に導くことにより、その自発輻射確率は、その空洞の Q 値、 8×10^8 (2K)、倍だけ増幅されたことを報告している。この結果は、空洞中でその共振モードの電磁波の零点振動の振幅が、超電導体空洞壁内の電子場との相互作用により、 Q 倍されたものと理解される。³⁾ 重要点は共振空洞中では量子揺動電磁波のモードが変化し、共振しないモードの零点振動の振幅は激減し、共振するモードの零点振動の振幅は 10^9 倍といった形で激増することである。この辺の数理解析は、通常のQ. E. D. の解析²⁾ より高度なもので、連続スペクトラムを不連続スペクトラムで近似する数理解析上の問題が絡むことを注意する。しかしながら、この事実は、通常のマイクロ波用共振空洞が、外界よりの電磁波の侵入を遮断し、その内部ではその共振モードのみを保有して、それ以外のモードを許さないという確認された巨視的 c -数的現象を、単純に q -数体系の言葉に移行させたものであって、新物理学の枠組みの中で必然的である。

従って、一般に超電導電子群の電子場と零点振動光子場とは激しく相互作用すると結論される。さて高温超電導体の典型例として、YBa₂Cu₃O₇ を取ると、イオン結晶を基礎としており、陽イオンと陰イオン

	Y ³⁺	Ba ²⁺	Cu ²⁺	Cu ³⁺	O ²⁻	e ⁻	
			[1]	1	1	1	
		1			1		
	1			1	2	-1	Active superconductive zone
				1	2	-1	
		1			1		Passive superconductive zone
			[1]	1	1	1	
		1			1		
				1	2	-1	
	1					3	

が共存し、イオン性の結合を持っている。

Diagram 1 に本論文の観点に立つ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ の結晶構造が示される。結晶は c 軸に沿って層状構造を取る。金属酸化物の常識に従って4)、

Diagram 1. The layered structure of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, as shown along the c -direction. The unit cell constant, c , is about $11.68 \text{ \AA}$. e^- indicates the electron and -1 means that the four additional electrons of 2O^{2-} are reduced effectively to three by the attractive electric field of Y^{3+} ion. Electric charge neutrality of each layer is assumed in the construction of the diagram. The bracket, [], indicates the non-superconductive case where the non-magnetic Cu^{3+} and one superconductive electron are replaced by a magnetic Cu^{2+} ion.

積層される各二次元層内で、電荷の中性化が成立して居ると仮定されている。この仮定は、もし実質的にそうでなかった場合、非常に強い電場が発生することから、妥当なもので、磁性酸化物で実証されている。 Y^{3+} イオンを含む層を能動性の超電導層と考え、 Ba^{2+} で挟まれた層を受動性の超電導層としたのは仮定であるが、 Y^{3+} イオンを磁気的な $4f$ 稀土類 R^{3+} で置換しても超電導性が変わらないという実験事実は、以下に説明される本増幅機構が作用している限り、 Y^{3+} イオンを含む層が、超電導層でないと断定させない。本解析では、Diagram 1 にその一例が示されたような形式で、そのイオン性結晶格子の上に超電導電子群が形成されると考える。そうした上で、結晶格子を無視し、一個の超電導電子に着目し、その電子場と、超電導体内の零点振動光子場との相互作用を一般論で取り扱う。電子場と光子場を考える実空間としては、層状構造の最小単位、即ち、Diagram 1 の能動の超電導層を先ず考える。それが共振空洞を形成するか否かは、通常の導体壁を持つ真空空洞とは異なり、電導電子群が空洞内部そのものに分布しているので、一義的には断定できないが、他の層の電子場との相互作用をも考慮した上で、磁区構造やマイクロ波の共振空洞中のモードに類似した定在波モードが形成されるものと仮定する。この際、共振空洞の定在波モードと同様、関係し得るモードの数は、 10^5 以上であるが、磁区構造のようにその内の一つを協力的に選択するかどうかは判らない。さて、光子場の生成・消滅演算子を使用し、かなり高度の、しかし、ある意味では単純な、新物理学による量子電磁力学解析は、その定在光子場の各モードの振幅が、一電子当り 10^{-7} 以上程度励起され得ることを予言する。此の増幅は更に二つの因子で拡大される。一つは関与する電子の個数であって、層の広がり 1μ 以上と考えると、関係電子数は 10^7 個以上になる。第二は酸化物としての共振空間の Q 値の関与した協力現象的増幅である。先述の西独 Sh-leich, Walther の実験は、励起原子からのマイクロ波の自発輻射確率が、その置かれた空洞空間の Q 値に比例し、Nb 超電導壁空洞の場合、 2K で、 $Q = 8 \times 10^8$ 倍の確率の増大を観測している。我々の場合、関係モード数の考慮から波長 $10\text{A} - 100\text{A}$ と言った光子場が重要かと予想されるが、その Q 値を決定するのは熱振動格子場との結合の強さであろう。それについては後ほど説明する。しかし、たとえ波長に比例して減少するとして 10^2 倍の増幅でも重要である。こうして増幅された零点電磁場の振動を媒介として、多数個の電子場と光子場のコヒーレントな複合揺動体状況が形成されると推定する。この複合体における位相整合状態の一つの描像は、光子場のベクトルと整合した電子場、従って、電荷及び電流密度波の揺動である。なお、新物理学はこの電子場が従来の常識と異なり単一の電子場でも電荷電流密度波の揺動を持ちうると考える。この機構による電子場光子場複合体の励起は、一旦励起されると、光子場の振幅は指数関数的に増大するいわゆる協力現象の可能性はある。なお、この複合体の形成により、電子場は光子場と整合し、従って光速で連結され超電導体全体に及ぶコヒーレントな位相が形成される。位相の揃うことは超電導電子群の重要な特徴であって、このことにより超電導性が大略保証される。光子場と電子場との位相の整合に関しては、金属・酸化物の差は重要でないと予想される。従って、超

電導体の、いわゆる、オーダー・パラメータの担い手は、この光子場電子場複合体の形成にある可能性がある。この励起作用の存在下で、受動性の層中の Cu^{2+} が $\text{Cu}^{3+} + e^-$ の超電導層に変換すると予想する。 Cu^{3+} の最も単純な描像はスピン零の低スピン状態イオンである。こうして超電導体の内部には、増幅された定在波光子場と、それにより修飾され、コヒーレントに全体が整合した多数個の電子群の持つ電子場による複合体が合成され则认为する。この複合体の形成には、熱振動格子場 (Thermal Phonon) との結合が小さく無秩序熱振動系からの影響の小さいことが必要である。単純金属では金属陽イオンは金属状態電子場の中に浮かんでいる。その意味で、100Å 以上の波長を持つ光子場の E ベクトルと容易に結合して一様な変位移動を行い得る。ところが、金属間化合物、更に酸化物となると、イオン性と等極性の混合した結合状態が形成され、E ベクトルにより容易には動かされないし、又、動くとしても正負イオンが逆方向に動く光学モードであって、音響モードである熱振動格子場との結合は小さい。従って、この超電導機構の存在は、良質の立方晶金属電導体が高温超電導体にならない理由を与える。この機構は、Phonon とスピンに関係しないから、同位元素効果は小さく、クーパー・ペアの形成を妨げず、磁性イオンの存在に鈍感である。クーパー・ペアの形成に関しては、メビウス帯状態 (Mobius' band's state) という電子場状態の新概念を導入する予定である⁵⁾ が、本解説では触れない。能動的超電導層の k - 空間のモード構造と電子個数との関係で、層の厚さが厚いほど、関係モード数と関係電子数が増加し、本機構による増幅が強まると予想される。この予想とそうした物質を人工格子的もしくは結晶化学的に合成する実験の可能性が、本年初め一月の時点で提起されたが、その後の Bi 系、Tl 系など、新高温超電導体の発見とその構造解析は、その予言の正当性を立証して居るように思われる。なお、英文のより数学的な解析はプレプリントの形式で 1 月より国内外に配布され、その要約の一部は日本物理学会第 43 回年会で発表された⁶⁾。なお、我々も高温超電導体の実験的研究を開始した。右図は $\text{BiPbSrCaCu}_{1-x}\text{O}$ 系に対するその第一報である。試料はそれぞれの酸化物と炭酸化物を出発原料として、845°C 120hrs の焼成によって得られた。詳細な研究報告は秋の学会で行う。なお典型的なイオン結晶として、電導性化合物の研究が必要と推論する。電子場光子場複合体の実験的検証も望まれる。

1)、飯田修一：物性研究編集部に原稿提出(1986)。しかし公表されていない。

2)、J. J. Sakurai: "Advanced Quantum Mechanics", Addison-Wesley Pub. Co., Reading, Mass. et al. (1967).

3)、W. Schleich and H. Walther: Proc. 2nd. Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics, Tokyo (1987) p.p. 35, 27.

4)、S. Iida: J. Phys. Soc. Jpn. 12 (1957) 222.

5)、S. Iida: to be published.

6)、飯田修一：予稿集 3 日本物理学会第 43 回年会 (郡山) (1988) p. 1.