

氏名・(本籍)	てらしま けん せい 寺 嶋 健 成
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第2404号
学位授与年月日	平成20年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)物理学専攻
学位論文題目	高分解能角度分解光電子分光による高温超伝導体の不純物効果の研究
論文審査委員	(主査) 教授 前川 禎 通 教授 高橋 隆, 山田 和 芳, 小林 典 男 准教授 野島 勉

論 文 目 次

1. 序論
 - 1.1 はじめに
 - 1.2 研究背景：高温超伝導体の物性
 - 1.3 光電子分光による高温超伝導体研究と未解決問題
2. 光電子分光法
 - 2.1 光電子分光
 - 2.2 光電子分光の原理
 - 2.3 角度分解光電子分光
 - 2.4 光電子スペクトル関数
 - 2.5 光電子スペクトル強度
 - 2.6 エネルギー・運動量分布関数 (EDCとMDC)
 - 2.7 光電子分光装置
3. 不純物置換 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ の角度分解光電子分光
 - 3.1 実験条件
 - 3.2 実験結果と考察
 - 3.2.1 バンド構造とフェルミ面
 - 3.2.2 超伝導ギャップと擬ギャップ
 - 3.2.3 光電子スペクトル形状
 - 3.2.4 多体相互作用とエネルギー分散
 - 3.2.5 Zn置換効果とNi置換効果の相違点
4. 不純物置換 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の角度分解光電子分光
 - 4.1 実験条件
 - 4.2 最適ドーブ $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の高分解能角度分解光電子分光

- 4.2.1 超伝導コヒーレンスピークの観測
- 4.2.2 超伝導ギャップと擬ギャップの比較
- 4.2.3 LSCOにおける多体相互作用
- 4.3 Zn置換 $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ の角度分解光電子分光
 - 4.3.1 フェルミ面形状
 - 4.3.2 多体相互作用への影響
 - 4.3.3 超伝導の破壊効果
- 4.4 LSCOとBi2212の比較
 - 4.4.1 多体相互作用
 - 4.4.2 超伝導コヒーレンスピークとエネルギーギャップ

5. まとめ

参考文献

発表論文

学会発表

謝辞

論文内容要旨

銅酸化物高温超伝導体は、Cuを他の3d遷移金属で置換すると急激な超伝導転移温度 (T_c) の減少を示すが、BCS超伝導体と異なり、磁性不純物だけでなく、非磁性不純物で置換した場合でも顕著な T_c の抑制が見られる。不純物置換した高温超伝導体の高分解能角度分解光電子分光 (ARPES) を行い、高温超伝導体における不純物置換による電子状態および多体相互作用の変化、さらに T_c 抑制の機構について研究した。

1. 高分解能光電子分光装置の建設・改良

微細な不純物効果の精密測定を遂行するにあたり、現有の光電子分光装置では実質的なシグナル強度とエネルギー分解能が不十分であるという問題点があった。この背景には、光電子分光は表面敏感な実験手法であり、希ガス放電管を用いる室内光源でのARPESでは、光源槽に存在する残留不純ガスの試料表面への直撃により、試料表面が急速に劣化するという問題があった。これを防ぐため、光源槽を改良して紫外光のみを通す極端紫外フィルターを設置し、材質および膜厚の調整やフィルター表面の酸化の抑制などにより、光の透過率の最適化を行った。その結果、最大透過率25%で二日以上安定した連続測定が可能となり、高い統計精度の実験を実現することに成功した。改良した高分解能角度分解光電子分光装置を用いて、以下の研究を行った。

2. 電子状態に対する不純物効果

非置換およびZn、Ni置換 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi2212) (それぞれ $T_c=90\text{K}$ 、 85K 、 85K) の高分解能ARPES測定を行い、不純物が電子状態に与える影響の直接観測に成功した。具体的には、不純物置換した試料において超伝導状態で発達するコヒーレンスピークの観測に成功し、超伝導ギャップサイズは各試料で同程度である一方、超流動密度に対応するピークの強度が不純物置換により顕著に抑制されることを見出した。

各試料におけるピーク強度と T_c との対応を調べた結果、非置換およびNi置換した試料のピーク強度と T_c との間にスケーリング則が成り立っている一方、Zn置換した試料はスケーリングから外れていることを見出した。さらに、Zn置換した試料においてのみ、分散を示さないギャップ内状態の増大を観測した。

電子状態に対するZn置換効果の普遍性・物質依存性を明らかにするため、Bi2212と T_c の大きく異なる $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LSCO) ($T_c=37\text{K}$) におけるARPES測定を行った。その結果、LSCOにおける超伝導コヒーレンスピークの観測に初めて成功し、さらにZn置換によるピーク強度の急激な抑制を観測した。また、Zn置換LSCOにおける超伝導ギャップサイズが非置換の試料と同程度であることや、分散を示さないギャップ内状態のZn置換による増大を見出し、Zn置換効果が異なる物質間で共通していることを見出した。以上の実験結果は、Ni不純物が系全体の超流動密度を弱く抑制する一方で、Zn不純物は超伝導を局所的に強く抑制することで超流動密度を減少させていることを示唆している。このことから、不純物置換による T_c の抑制には、コヒーレントな超伝導対の形成に対するZn, Ni不純物による阻害効果が重要な役割を果たしていると考察した。

3. 多体相互作用に対する不純物効果

電子が特定のモードと強く結合している場合、角度分解光電子スペクトルのピーク分散には、モードに対応するエネルギーで折れ曲がり (kink構造) が観測される。高温超伝導体における多体相互作用の起源を明らかにする目的で、不純物置換が与える分散中のkink構造への影響を研究した。具体的には、 $(0, 0) - (\pi, \pi)$ 方向と、 $(\pi/2, \pi/2)$ と $(\pi, 0)$ の中間の波数 (オフノード) で測定した非置換およびZn、Ni置換Bi2212の超伝導状態におけるバンド分散の比較を行った。その結果、 $(0, 0) - (\pi, \pi)$ 方向ではバンド分散に不純物による影響がほとんど観測されないのに対して、オフノードでは不純物置換によるkink構造の抑制を観測した。さらに、オフノードにおけるkink構造の温度変化を測定した結果、 T_c より高温では、非置換やNi置換の試料でkink構造がほぼ消失する一方、Zn置換の試料において有限のkink構造を観測した。これらの不純物置換の試料におけるkink構造の強さの波数・温度依存性は、中性子散乱実験で報告されている $Q=(\pi, \pi)$ を中心とした反強磁性磁気励起と定性的に一致することを見出した。

多体相互作用に対する不純物効果の普遍性・物質依存性を明らかにするため、Bi2212と磁気励起の大きく異なるLSCOにおいて、バンド分散に対するZn置換効果の測定を行った。その結果、非置換の試料において超伝導状態に顕著に現れるkink構造の観測に初めて成功した。さらに、それぞれの物質におけるkink構造のエネルギー位置が磁気励起の特徴的エネルギーに対応し、LSCOにおける構造もBi2212と同様、Zn置換により抑制されることを見出した。

4. まとめ

以上を総括すると、不純物置換 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ および $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の高分解能ARPESを行い、非置換の試料との電子状態の比較を行った。大まかなバンド分散やフェルミ面形状への超流動密度に対応するコヒーレンスピークの抑制と、Zn置換に伴うギャップ内状態の形成を見出した。この実験結果は、非磁性 (磁性) 不純物がそれぞれ局所的 (全体的) にコヒーレントな超伝導対の形成を阻害することで、 T_c を抑制している事を示唆している。また、不純物置換した試料において、多体相互作用により現れるkink構造の不純物・波数・温度・物質依存性に、反強磁性磁気励起との良い対応を見出した。この結果は、超伝導ギャップが大きく開く $(\pi, 0)$ 近傍の波数領域の電子が、反強磁性磁気励起と強く相互作用していることを示している。

論文審査の結果の要旨

銅酸化物高温超伝導体における超伝導発現機構解明に向けて精力的な研究が行われているが、現在多くの未解決問題が残っている。特に、フェルミ準位近傍における多体相互作用と超伝導機構との関係や、エネルギーギャップの起源などは、多くの実験グループの活発な研究にも拘わらず、統一的な解釈はできていない。

本論文では、銅酸化物高温超伝導体に磁性および非磁性不純物を少量置換することによって、フェルミ面や超伝導ギャップなどの電子構造、多体相互作用の起源、超伝導転移温度抑制メカニズムを、高分解能角度分解光電子分光を用いて明らかにしたものである。特に、これまで大きな論争的となっていたフェルミ準位近傍の多体相互作用の起源が「フォノン」か「磁氣的相互作用」という問題に対して、バンド分散の折れ曲がり (kink) 構造の不純物置換依存性を、高分解能で精密に決定した。その結果、超伝導機構に密接に関係するオフノード領域の電子が、磁気励起と強く結合していることを明らかにした。また、超流動密度やギャップ内状態に対する不純物置換効果が、Zn と Ni で顕著に異なる事を明らかにし、非磁性と磁性不純物における超伝導転移温度抑制のメカニズムが大きく異なることを提案した。

寺嶋健成提出の論文は、現在大きな論争を呼んでいる高温超伝導体における多体相互作用の起源や不純物置換効果について重要な知見を与えるものであり、その研究成果は高く評価される。この成果は、提出者の寺嶋健成が高度の学識と自立して研究する能力があることを示すと判定される。よって博士 (理学) の学位論文として合格と認める。