

論文の内容の要旨

論文題目：高温超伝導体の不純物置換効果

後藤昌宏

指導教官 内田慎一教授

まず最初に問題となるのは不純物置換効果とは何かということである。高温超伝導体において不純物を高々数%いれると T_c は完全になくなり、超伝導をこわしてしまう。この効果のことをさすのであるが、はたしてでは不純物とはなんなのか？という問題にぶちあたる。La 系高温超伝導体の場合、La に Sr を置換していくと、 CuO_2 面内のキャリア数がかわり T_c が増減する。たとえば、 La_2CuO_4 に Sr を La の 8%程度いれることによって T_c が 0 から 40K にまで上昇する。しかしながらこれは CuO_2 面にキャリアをドーピングしたことによる効果であり、けっして不純物置換効果とはいえない。これにたいして、Cu サイトに Zn などを入れていくと、 T_c はただか数%のオーダーでなくすことができる。[1] つまり、不純物置換効果とは CuO_2 面内の Cu サイトにいろいろなもの (Cu 以外のもの) をいれることをいう。

では、不純物置換で問題とすべきことは？

- 不純物の種類によって不純物置換効果が変わってくるのか？

たとえば Zn と Ni のように非磁性不純物と磁性不純物とでなにか変わってくるのか？

また、不純物のイオン価はなにかしらの影響をおよぼすのか？

- なぜ不純物によって T_c はさげられるのか？

ここで考えられるモデルを考えてみる。

1. BCS 理論でかんがえられた不純物効果をかながえた Bogoliubov-Golkov 理論によって、その理論を d-wave 超伝導体にあてはめたモデル。この場合は置換された不純物は何んでも敏感であり、その濃度によってスケールされるという考え方である。Alloul らの group が提唱している。[2]
2. Swiss-cheese model ... これは Columbia 大の Uemura group が考えたモデルである。Zn のような不純物のまわりにそれぞれおよぼされる範囲が穴ばこのように空きその部分が超伝導になることができないという考え方である。[3]
3. ρ_0^{2D} が T_c にスケールするという考え方である。これは Cooper pair の局在を考えており、2次元の超伝導体においてある抵抗率を超えると S-I transition をひきおこすと考えられる。これは薄膜の金属等で実際観測されている。[4]
4. Zn などの不純物によって Stripe が pin されて Stripe が静的になることによって T_c がさげられるというモデルである。これは東北大の小池グループによって提唱されている。[5]

本研究においてはこの2つの問題点について議論するためにいろいろな不純物、非磁性不純物 Mg, 磁性不純物である Ni, イオン価の違う Li, Al を CuO_2 面に置換して抵抗率と帯磁率、 μSR 実験をすることによって明らかにした。

最初にすべての不純物を置換した系における Mg, Zn を置換した YBCO の残留抵抗と磁気モーメントの不純物濃度依存性を図 1 に、Al, Li, Zn を置換した LSCO の残留抵抗と磁気モーメントの不純物濃度依存性を図 2 に示す。

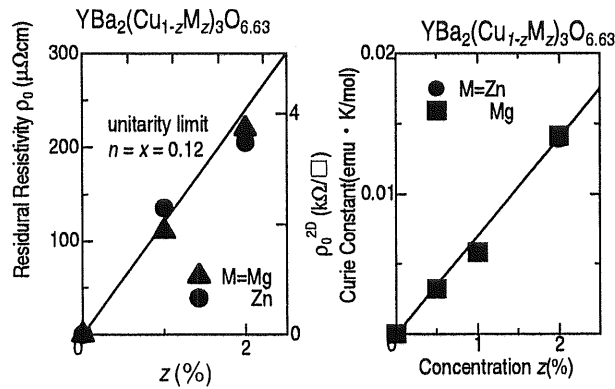


図 1: YBCO における残留抵抗と磁気モーメントの不純物濃度依存性

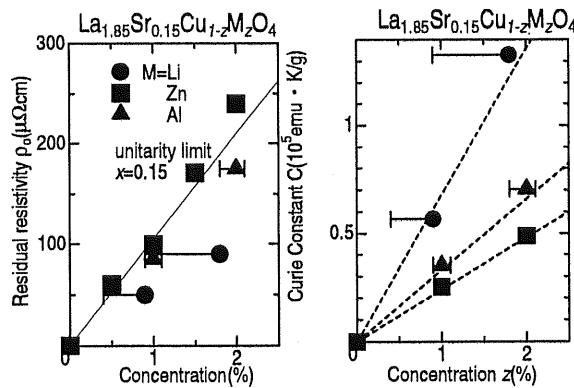


図 2: LSCO における残留抵抗と磁気モーメントの不純物濃度依存性

この図から見ると Al, Li とともに残留抵抗は小さくなり、磁気モーメントが大きく出ている。これは、次のように解釈される。Al, Li はイオン価がまわりの Cu と違うために余分な電子 (Al の場合) かホール (Li の場合) がドーピングされる。しかしながら、電気抵抗率から見ると傾きが変わっておらず、これは CuO_2 面内のキャリア数に変化しないことを表す。この2つのことから Al, Li のまわりにホール (Al の場合) か電子 (Li の場合) がトラップされてスカーミオンのようにそれが自由モーメントを引き起こして磁気モーメントを大きく出していると考えられる。つまりは、Li, Al のイオンは高温超伝導体の中では、通常非磁性のイオンであるにもかかわらず、磁性をもった不純物として振舞うことになる。

次に電気抵抗率が小さくなることであるが、これはフランスの Alloul グループ [6] や阪大の石田らの論文 [7] が示している Li, Al とともに大きな散乱を示す不純物であるということと矛盾する。これは、ここで示している Li, Al の濃度が nominal な値を示しており正確な値を出しているとは言い難い点にある。しかしながら本論文においては T_c と不純物の関係を見ているためにあまり大きな問題点とは言えないが、前述の2つの論文との整合性と、Al, Li の量が多く入ることはありえない

ことを考えるにやはり、Al,Li ともにユニタリー極限を示す不純物と考えることが妥当である。結局、非磁性不純物であろうと磁性不純物であろうと、イオン価が変化しようとも、また 3d の軌道に電子がなくても不純物は同じ役割をはたすということがこのデータからわかる。

ここで、最初の問題点の 2 個目に入る。 T_c がなぜ不純物によって落ちるかという問題である。本研究によるデータをそれぞれにあわせてみてちゃんと整合性があるのかということを考えてみる。まず一番目の Fermi-liquid モデルで考える場合 [2]、いろいろな不純物を d-wave 超伝導体に導入された normal impurity として考えた T_c の落ち方は、

$$\ln\left(\frac{T_c}{T_{co}}\right) = \Psi\left(\frac{1}{2}\right) - \Psi\left(\frac{1}{2} + \frac{\alpha T_{co}}{2\pi T_c}\right)$$

$$\Rightarrow k_B \Delta T_c = \frac{\pi}{8} \Gamma$$

の式で表される。ここで $\Psi(x)$ はデガンマ関数、 Γ は対破壊パラメーターであり、

$$\Gamma = \frac{\hbar}{\tau_{imp}} = \frac{2n_{imp}}{\pi N(0)}$$

となる。これでは、ホール数に関係なく T_c の落ち方が ρ_o に比例することになり、本研究の結果を説明することが出来ない。次に 4 番目のモデルであるが Stripe が不純物によって pin されるという考察である。これは、定性的に考えるとまず LSCO と YBCO での違いがないということから否定される。いままでの中性子の実験から考えられるに、LSCO と YBCO では LSCO のほうが Stripe が安定化しやすく、YBCO にいたってはスピンの相関が見られたに過ぎない [8]。

次は 3 番目の swiss-cheese model であるが [3]、まず Ni と Zn を置換した系における $\sigma(T \rightarrow 0)$ と T_c の関係を図 3 にのせる。

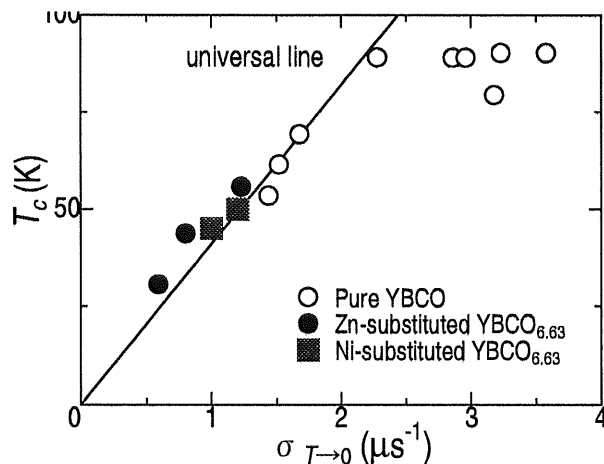


図 3: Ni と Zn を置換した YBCO における μ SR 実験

これをみると Ni,Zn を置換した系において非常によく underdope 領域における universal line にのっているといえる。このことからこのモデルは良いように見えるが、Ni,Zn を置換した Bi 系の超伝導体の STM[9] との整合性がとれない。これは、Zn によっては超伝導ギャップがはっきりとつぶされているのに対して、Ni を置換した系においては片側の超伝導ギャップだけが壊されており、完全に破壊されていない。つまり、Ni と Zn における超伝導の破壊のされかたに相違があり、ただ、不純物が穴ぼこをあけて超伝導の coherence が不純物まわりになくるとは考えにくい。

そこで最後のモデルになるが、まず図 4 を見てみる。

これをみるに underdope 領域において非常によく一直線の line に乗っていることを表す。それも、様々な不純物においてずれることはなく不純物の違いや高温超伝導体の種類にもよらないことがわ

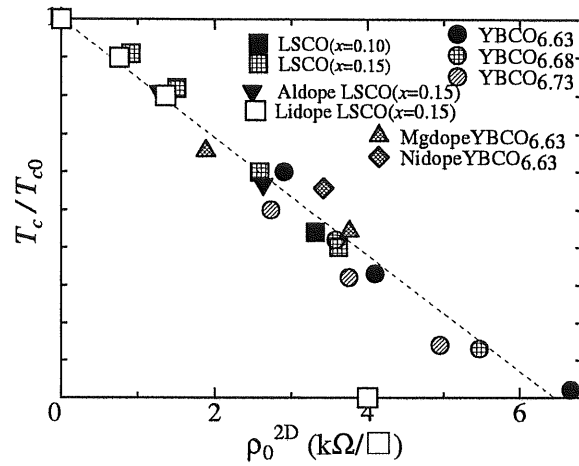


図 4: ρ_0^{2D} と T_c/T_{c0} をプロットしたもの。underdope 領域において T_c と ρ_0^{2D} は一定の直線にのる。

かる。これは、Emery 達が提唱している不純物が入ることによって超伝導体の Coherence がくずれそれによって T_c がさがっていることをあらわしている [10]。また、 μ SR の実験からもわかるように超伝導キャリアは減少しているのであるからその Coherence のくずれによってもともとあった超伝導キャリアが動けなくなっていると考えるのが妥当と考えられる。つまりは、超伝導体の不純物効果は超伝導キャリアの trap によって引き起こされていると考えられる。

- [1] H.Harashina *et.al.* Physica C **212** 142(1993)
- [2] R.J.Radtke *et.al.*, Phys. Rev. B **48**, 653(1993)
- [3] Nachumi *et. al.*, Phys. Rev. Lett. **77**, 5421(1996)
- [4] Fukuzumi *et. al.*, Phys. Rev. Lett. **64** 684(1996)
- [5] Akoshima *et. al.*, Phys. Rev. Lett. **57** 7491(1998)
- [6] Bobroff *et. al.*, Phys. Rev. Lett. **83** 4381(1999)
- [7] K.Ishida *et. al.*, Phys. Rev. Lett. **76** 531(1996)
- [8] P.Dai *et. al.*, Phys. Rev. Lett. **77** 5425(1996)
- [9] S.H.Pan *et. al.*, Nature **403** 746(2000)
- [10] V. J. Emery and S. A. Kivelson, Nature **374** 434 (1995),
V. J. Emery and S. A. Kivelson, Phys. Rev. Lett. **74** 3253(1995)