

ナノ粒子における超伝導性に関する理論的研究

(1金沢大院自然・2ボゴリユボフ理論物理研究所) ○長尾 秀実¹・Thi Viet Bac Phung¹・橋本 泰平¹・Sergei P. Kruchinin²

近年のナノスケール技術の発展により、微細粒子（数百から数十ナノメートル）のナノスケールサイズのクラスタ生成や加工が可能になってきている。このような微細粒子系ではバルクのような連続エネルギー準位分布ではなく、クラスタ特有の離散的エネルギー準位分布が端緒とする未知の物性出現の可能性が高い。本研究ではナノスケールサイズのクラスタ電子特性、特に超伝導性に関する新しい理論的考察を行った結果を報告する。

ナノサイズ固有の物性発現研究が行われている。1996年にBlack、Ralph、Tinkham (BRT) はナノスケールAlにおける超伝導性の実験報告を行った[1,2]。ナノサイズではフェルミ面近傍のエネルギーは離散的になる。レベル間のエネルギー差とbulk超伝導ギャップとの関連性が示され、bulkギャップよりレベル間エネルギーが大きくなると超伝導性の消失が報告された。最近の実験ではNb[3]やIn[4]についての同様の報告がされている。この超伝導性消失のサイズ依存性についての話題は古く、1959年にP. W. Andersonによって指摘されていた (Dirty Superconductors)[5]。そのナノ粒子の超伝導性を記述するハミルトニアン(Pairing Hamiltonian)が提案され、1963年にはその厳密解を導く方程式(Richardson方程式)がR.W. Richardsonによって導かれた[6]。

一方、ナノ粒子系に磁性不純物がある場合は、電子状態がマクロに現われる超伝導状態と近藤効果の競合という観点から興味深い[7]。上述のpairing Hamiltonianに加え、Schrieffer-Wolff変換によって得られるeffective low-energy Hamiltonianを考える。Pseudofermionを導入後、超伝導と近藤効果を導く有効相互作用項を得る。

平均場近似を用いるとナノ粒子系電子と磁性不純物とのスピン-重項オーダーパラメータとナノ粒子系電子による超伝導オーダーパラメータが定義できる。このとき超伝導発現および近藤効果発現の臨界サイズが計算できる (図1)。

平均場近似の範囲内で超伝導状態

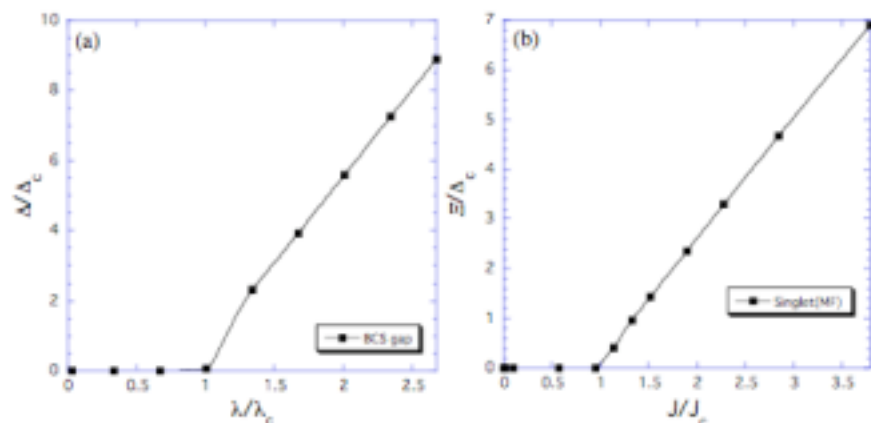


図1 超伝導と近藤効果のサイズ依存性

と近藤効果の共存領域も見積もることができる。超伝導対のカップリングと磁性不純物との相互作用カップリングの大きさが同程度の場合、図2に示すような共存領域を見ることができる。

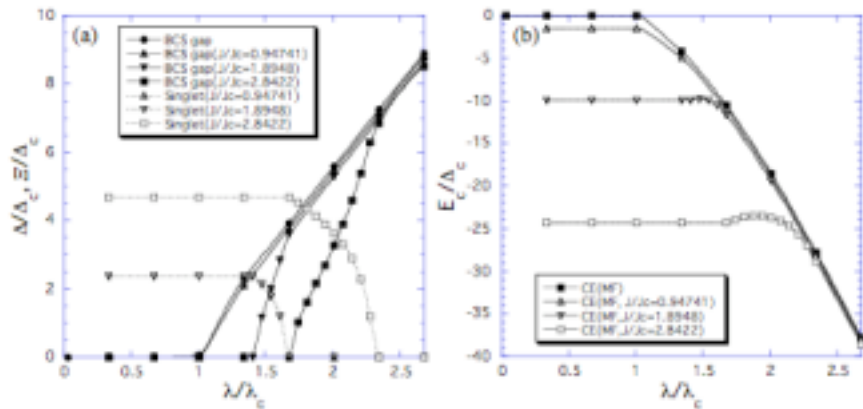


図2 超伝導と近藤効果の競合と共存

超伝導状態に対する厳密解はRichardson方程式を解くことによって得られる(図3)。また、近藤効果を表す厳密解を与える方程式の導出に成功した。

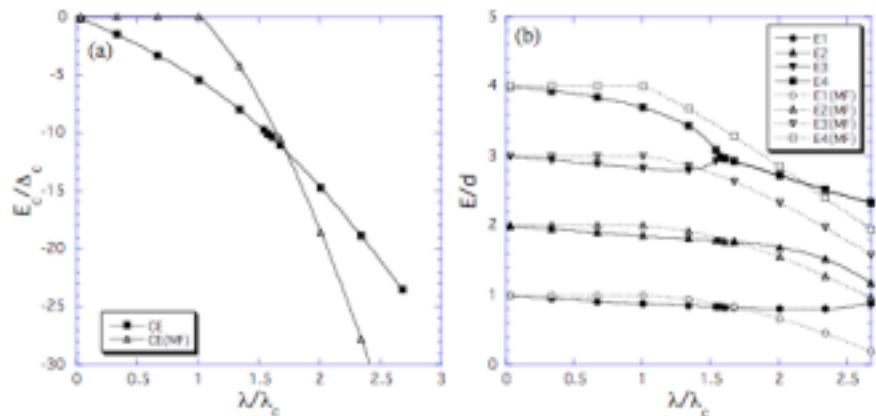


図3 超伝導状態の厳密解

2 ギャップ超

伝導ナノ粒子に対する平均場近似レベルでの臨界サイズ等の物性も議論でき、この厳密解を導く方程式も導出した[8]。

References

- [1] C. T. Black, D. C. Ralph, and M. Tinkham, *Phys. Rev. Lett.* 76, 688 (1996).
- [2] D. C. Ralph, C. T. Black, and M. Tinkham, *Phys. Rev. Lett.* 74, 3241 (1995).
- [3] S. Bose et. al., *Phys. Rev. Lett.* 95, 147003 (2005).
- [4] W. -H. Li et. al., *Phys. Rev. B* 72, 214516 (2005).
- [5] P. W. Anderson, *J. Phys. Chem. Solids*, 11, 28 (1959).
- [6] R. W. Richardson, *Phys. Lett.*, 3, 277 (1963).
- [7] H. Nagao, S. Kruchinin, to be appeared.
- [8] H. Nagao, H. Kawabe, S. P. Kruchinin, NATO Science Series, II Mathematics, Physics and Chemistry -Vol.241 "Electron Correlation in New Materials and Nanosystems", (Edited by Kurt Scharnberg and Sergei P.Kruchinin) Kluwer Academic Publishers (2007), 117-127.