

(金沢大院・自然) 橋本 泰平

・岩山 将士・齋藤 大明・西川 清・長尾 秀実

## 【序】

近年のナノスケール技術の発展により、半導体や金属などで作られた十数ナノメートルの微細な粒子の生成や加工が可能になってきている。微細な粒子中の電子やホールエネルギー状態は離散的となっており、また粒子のサイズを変えることでエネルギー状態を選択的に変えることが出来るため、新規性材料として期待されている。

本研究では、ナノスケールの超伝導性を記述する pairing ハミルトニアンに外部磁場の項が加わった時の応答を Richardson 方程式を用いて求め、Al の微細粒子における超伝導状態のサイズ依存性とその応答について理論的研究を行った。

## 【計算】

計算モデルは、Al 原子を fcc 格子に配置した長方体モデルを用いる。ナノスケールの粒子では、フェルミ面近傍のエネルギー準位は離散的になっており、そのサイズを変えることでエネルギー準位は変化するので、本研究では底面を固定し、高さを変えることでサイズ依存性を議論した。ナノスケールの超伝導性を記述するために pairing ハミルトニアン(式 1)を用いた。

$$H = \sum_{i,\sigma}^N \varepsilon_i a_{i\sigma}^\dagger a_{i\sigma} - g \sum_{i,j}^N a_{i\uparrow}^\dagger a_{i\downarrow}^\dagger a_{j\downarrow} a_{j\uparrow} \quad (1)$$

このハミルトニアンは、同じ軌道の スピンと スピンの電子が凝縮するモデルである。 $g$ はカップリング相互作用である。その厳密解は R.W.Richardson によって導かれた方程式(式 2)で与えられる[1]。

$$1 - \sum_j^U \frac{g}{2\varepsilon_j - E_{J\nu}} + \sum_\mu^n \frac{2g}{E_{J\mu} - E_{J\nu}} = 0 \quad (2)$$

$E_J$ は電子対のエネルギーを表す。Richardson 方程式の導出については Jan らの論文で紹介されている[2]。超伝導状態の厳密解は Richardson 方程式を解くことによって得られた(図 1)。図 2 に上記の計算モデルを用いて、Al 粒子における凝縮エネルギーのサイズ依存性を示す。エネルギー準位間隔と凝縮エネルギーの間には深い相関がある。

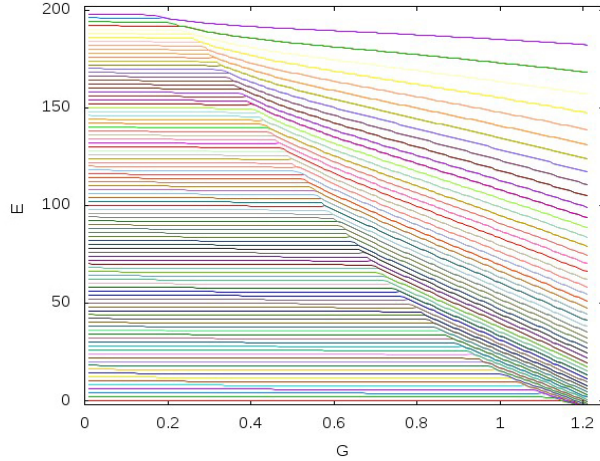


図1 超伝導状態の厳密解

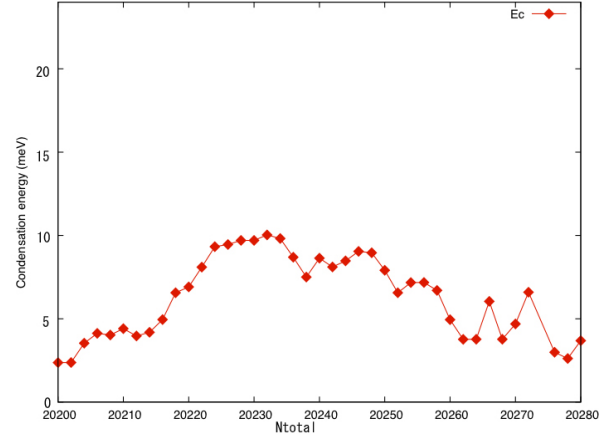


図2 凝縮エネルギーのサイズ依存性

次に、電子系の外部磁場に対する応答は、線形応答理論を用いると磁場に対する応答電流の式

$$\begin{aligned}
 \langle \hat{J}_{Ai}(\mathbf{x}, t) \rangle = & -\frac{n_0 e^2}{mc} A_i(\mathbf{x}, t) \\
 & + \frac{1}{c} \int d^3 x' \sum_{j=1}^3 S_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{x}', 0) A_j(\mathbf{x}', t) \\
 & + \int d^3 x' \int_{-\infty}^t dt' \sum_{j=1}^3 S_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{x}', t-t') e_j(\mathbf{x}', t')
 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで  $S_{ij}$  は次のように定義される

$$S_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{x}', t) \equiv \left(\frac{c}{m}\right)^2 \int_0^\beta \langle \hat{p}_j(\mathbf{x}') \hat{p}_i(\mathbf{x}, t + i\hbar\lambda) \rangle_\beta d\lambda \quad (4)$$

で求められる。(3)式を AI 微細粒子について解くことで、超伝導電流を導くことが出来る。1996年にナノスケール AI における超伝導性の実験報告がされており、バルク超伝導ギャップとの関連性が示され、バルクギャップよりフェルミ面近傍の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ている [3, 4]。

本研究では、AI 微細粒子のそれぞれのサイズにおいて誘導される超伝導電流を見積もることで、超伝導状態のサイズ依存性を示す。これらの結果から、AI 微細粒子における超伝導状態の安定性と応答電流の関係を示すことができる。詳細な考察は、当日報告する。

#### 【参考文献】

- [1] R. W. Richardson, *Phys. Rev.* **141** (1966) 949.
- [2] F. Braun, J. von Delft, *Institut für Theoretische Festkörperphysik, Universität Karlsruhe*, **76128** Karlsruhe, Germany(1999)
- [3] C. T. Black, D. C. Ralph, and M. Tinkham, *Phys. Rev. Lett.* **76** (1996) 688.
- [4] D. C. Ralph, C. T. Black, and M. Tinkham, *Phys. Rev. Lett.* **74** (1995) 3241.