

空間構造をもつ電子系の場の理論¹物質・材料研究機構 計算材料科学研究センター 田中秋広²

銅酸化物高温超伝導体 (HTSC) やマンガン系酸化物等、強相関電子系の物理では何らかの空間パターンを示す電子状態が問題になる場面がよく見受けられる。非摂動的な効果が本質的に重要で手持ちの手法では扱いが困難となる場合が多い。

例えば、HTSC の多くで観測されるストライプ相に関していつも問題となるのは、ストライプに沿ってメタリックな性質を持つ状態から出発して、如何にして（それと 45 度の角度を成す方向にギャップノードを持つ）d 波超伝導 (dSC) が現れるのかという点で、この二つの状態をつなぐ物理的なプロセスは未開拓と言ってよい。(La_{1.28}Nd_{0.6}Sr_{0.12}CuO₄ に対する角度分解光電子分光の結果 [1] 等を見る限り、量子揺らぎの増大とともにストライプから dSC への移行をもたらすルートは実際存在すべきであろう。) 転位欠陥の凝縮が引き起こすストライプ秩序の量子融解は統計力学的な視点から調べられてはいるが、これは同時にフェルミオン自由度の状態変化も伴う筈である。転位がスピンの反強磁性秩序のテクスチュアにもなることに着目し、位相幾何学的な議論から融解時のフェルミオン運動量分布の変化を考察する方向の提案もなされている [2]。ともあれ、生成と消滅を繰り返すひも状物体を背景にしたフェルミオンの記述は明らかに既存の物性論の手法の得意とするところではなく、今のところ部分的な解析 [3] に満足するしかない。時には非常に基礎的なレベルでの数学的道具立ての開発の試みもなされるべきなのではないかと思える。

ストライプ以外にも、磁場中で電荷/スピン密度の変調が観測されており、超伝導と競合する何らかの秩序の存在を示唆している。また T_c 以下で光学フォノンとの結合による Cu 原子間の結合変調がいくつかの HTSC で報告されており注目を集めている。Bond centered wave の雛型として擬 1 次元スピンパイエルス系を希釈ドーブした場合の問題を文献 [4] で扱っている。このような問題では反強磁性 (AF) 揺らぎが電荷の運動に与える制約を正しく表現することが重要で、以下その要点について述べる。なお、AF 揺らぎがもたらす電荷への量子干渉効果の問題は、二次元正方格子上のホールホッピングに関してはスピнкаイラリティーの影響をゲージ理論として表す取り組みがよく知られ、定式化自体をめぐる議論も続いている。つい最近 Na_xCoO₂·yH₂O において、(RVB 描像とより自然につながると予想される) 二次元三角格子上の反強磁性体へのホールドーピングによる超伝導が観測されたとする報告が日本のグループによりなされ [5]、ここでも改めてこの種の揺らぎが問題となると考えられる。さて通常のボゾン化法で電子を扱うときの式、

$$\begin{aligned} R_{\sigma} &\propto e^{\frac{i}{2}[\theta_+ + \theta_- + \sigma(\phi_+ + \phi_-)]} \\ L_{\sigma} &\propto e^{\frac{i}{2}[-\theta_+ + \theta_- + \sigma(-\phi_+ + \phi_-)]} \end{aligned} \quad (1)$$

¹ この原稿は基研研究会「物性物理と場の理論」の講演内容の要旨である。

² E-mail: TANAKA.Akihiro@nims.go.jp; html: <http://www.nims.go.jp/cmssc/scm/index.html>

を改めて眺めてみよう ($\theta_{\pm}$ と $\phi_{\pm}$ はそれぞれ電荷とスピンの位相場)。スピン量子化軸は z 軸に固定されているので、たとえばスピンの 3 次元的な方向揺らぎを反映したベリー位相の完全な記述をこの方法は苦手とする。そこで右辺のスピン部分の位相因子を $SU(2)$ 行列 g で置き換えた非可換ボゾン化法 (NAB) を、扱い慣れた式 (1) の構造をなるべく保った形で応用することを考えたい。フェルミオンの双一次形式を構成して、たとえば文献 [6] の表 30.1 において $SU(2)$ の元を $g = e^{-i\phi+Q}$, $Q = \vec{n} \cdot \vec{\sigma}$, $|\vec{n}| = 1$ とパラメトライズすれば、NAB とは式 (1) において $\sigma_z \rightarrow Q = \vec{n} \cdot \vec{\sigma}$ という拡張を行ったことに対応することが分かる。この $\vec{n}$ はスピンの $2k_F$ 成分の方向を表す単位ベクトルで、それが local なスピン量子化軸になっているという意味で回転座標系におけるボゾン化法である。自由フェルミオンのスピン自由度の作用の表式

$$\mathcal{L}_{free}^{spin} = \frac{1}{4\pi}(\partial_{\mu}\phi_+)^2 + \frac{1}{8\pi}\sin^2\phi_+(\partial_{\mu}\vec{n})^2 + \frac{i}{4\pi}(2\phi_+ - \sin\phi_+)\vec{n} \cdot \partial_{\tau}\vec{n} \times \partial_x\vec{n} \quad (2)$$

を見るとスピンモーメントの形成の効果、方向揺らぎの運動エネルギー、それに付随するベリー位相の相互の兼ね合いがスピン位相場 ϕ_+ の挙動（相互作用で決まる）に支配されることが分かる。詳細は文献に譲るがさらに電荷の位相との結合を調べると、電荷の運動は $\vec{n}$ の揺らぎを表すスピングージ場を介して引き合う二種類のディラックフェルミオンであらわされ、超伝導揺らぎを誘起する可能性が示唆される。最近見つかった擬 1 次元スピンパイエルス物質 $TiOCl$ はドーブしたキャリアが非局在化する傾向が指摘されており [7]、このような枠組みで研究できる可能性があると考えられる。

参考文献

- [1] X. J. Zhou et al, Science **286** (1999) 268.
- [2] A. Tanaka and X. Hu, J. Low Temp. Phys., in press (2003).
- [3] H. Johannesson and G. I. Japaridze, cond-mat/0301585.
- [4] A. Tanaka and X. Hu, Phys. Rev. Lett. **88** (2002) 127004.
- [5] K. Takada et al, Nature **422** (2003) 53.
- [6] A. M. Tsvelik, *Quantum Field Theory in Condensed Matter Physics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge UK, 1995.
- [7] A. Seidel et al, cond-mat/0206374, cond-mat/0212199.