

1次元電子系における様々な秩序間の競合と量子臨界現象

京都大学 基礎物理学研究所 土射津 昌久、古崎 昭

1次元 1/2-フィルド拡張 Hubbard 模型における基底状態の相図

本研究では、1次元 1/2 フィルド拡張 Hubbard 模型:

$$H = -t \sum_{j,\sigma} (c_{j,\sigma}^\dagger c_{j+1,\sigma} + \text{h.c.}) + U \sum_j n_{j,\uparrow} n_{j,\downarrow} + V \sum_j n_j n_{j+1}$$

の基底状態について再考察を行った [1]。ここで $n_{j,\sigma} \equiv c_{j,\sigma}^\dagger c_{j,\sigma} - \frac{1}{2}$, $n_j \equiv n_{j,\uparrow} + n_{j,\downarrow}$ であり、 $c_{j,\sigma}^\dagger$ はサイト j , スピン σ の電子の生成演算子である。この模型では、強結合領域 ($U, V \gg t$) において、サイト間斥力 V を強くすることにより、 $U \simeq 2V$ でスピン密度波 (SDW) 相から電荷密度波 (CDW) 相への 1 次転移が起こることが知られている (Hirsch 1984)。また弱結合領域 ($U, V \ll t$) においては、摂動論的くりこみ群による解析により (Emery 1979)、 $U = 2V$ で SDW 相から CDW 相への 2 次転移が起こることが長い間信じられてきた。これらの結果から、1次元拡張 Hubbard 模型の基底状態では、弱結合領域での SDW 相から CDW 相への 2 次転移の境界が、相互作用を強くすることにより、tricritical point で 1 次転移の境界へと変化すると考えられてきた。ところが最近、この系の弱結合領域において、非自明な基底状態である bond-charge-density-wave (BCDW) 相と呼ばれる Peierls 状態が実現する可能性が示唆され (中村 1999)、注目されている。しかし、この相の出現の機構、及び統一的な相図については理解されていなかったため、我々はボソン化法に基づく解析的手法による議論を行なった。まず、Emery から続く従来のくりこみ群の取り扱いでは、この手法を適用するための有効理論 (g -ology) の結合定数を相互作用 U, V の最低次で見積もったが、我々は結合定数を相互作用の 2 次まで見積もることにより、SDW 相と CDW 相の中間相として BCDW 相が出現することを示した (図 1)。次に、準古典的な取り扱いから、BCDW 相がある種のウムクラップ散乱に対して不安定であることを明らかにし、この不安定性のために、中間結合領域で bicritical point が出現し、相互作用の強い領域では SDW 相から CDW 相への 1 次転移が起こることを示した。くりこみ群の手法を用いて得られる基底状態の相図を図 1 に示す。この結果は最近の数値計算による結果ともコンシステントであり、1次元拡張 Hubbard 模型の基底状態を統一的に理解にすることが可能となった。

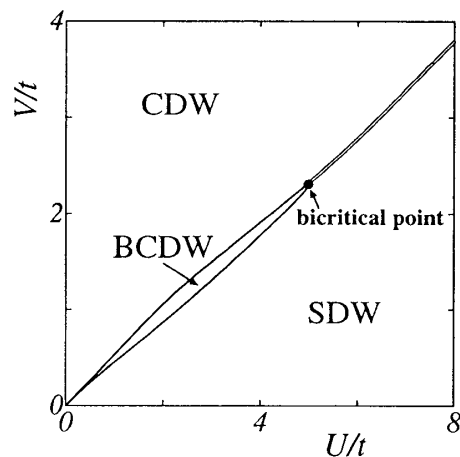


図 1: 1次元拡張 Hubbard 模型の基底状態の相図。2 重線は 1 次転移を示し、1 重線は 2 次転移を示す。

梯子格子系における基底状態と量子相転移

次に我々は、2鎖梯子格子上の 1/2 フィルド拡張 Hubbard 模型に着目し、1/2-フィルドの絶縁相として実現可能な絶縁相を統一的に調べ、さらにこれらの相の間の量子相転移の性質を調べた [2]。

1/2-フィルド梯子格子系で素朴に期待される基底状態は、通常の Hubbard 模型及び Heisenberg 模型で実現する d 波型ペアリングをもつ絶縁相 (D -Mott 相、あるいは rung-singlet 相とも呼ばれる)、及びサイト間の電子間斥力 V を強くすることで実現することが期待される CDW 相である。しかし、 $SO(5)$ 対称性を仮定した 2 鎖梯子系において、 D -Mott 相と CDW 相の他に、これらとは異なる対称性を破る相の出現が指摘され (Lin, Balents, Fisher 1998)、この相は自発的に時間反転対称性を破ったスタガード・フラックス相であることが示された (Fjærestad, Marston 2001)。

そこで我々は 1/2-フィルド 2 鎖梯子系で、より一般的な拡張 Hubbard 模型を取り扱い、基底状態に着目して以下の結果を得た。まず、この系で実現可能な基底状態は、異なる角運動量をもつ 4 つの密度波相 (s -density-wave 相、 p -density-wave 相、 d -density-wave 相、 f -density-wave 相) と、異なるペアリング対称性をもつ 4 つの Mott 絶縁相 (S -Mott 相、 D -Mott 相、 S' -Mott 相、 D' -Mott 相) であることを明らかにした (図 2)。ここで、 s -density-wave 相、 d -density-wave 相はそれぞれ、CDW 相、スタガード・フラックス相に対応し、 S -Mott 相 (S' -Mott 相) は s 波 (拡張 s 波) 型のペアリングをもつ Mott 絶縁相である。このうち特に S' -Mott 相は、整数スピン系において励起ギャップをもち局所的な秩序変数をもたない、いわゆる Haldane 状態に対応する。次に我々は量子相転移の性質に着目した。1 次元量子系における臨界現象のユニバーサリティ・クラスは、模型の詳細によらず、共形場理論 (CFT) によって統一的に分類される。我々の模型においては量子相転移点上でのみ臨界的 (critical) になり得るため、量子相転移の性質を CFT によって分類することが可能となる。この系の低エネルギー励起を記述する有効理論を求めその構造を調べることで、図 2 に示すような結果を得た。密度波相から Mott 絶縁相への量子相転移として異なる 3 つのタイプ [Ising (Z_2) criticality ($c = \frac{1}{2}$), $SU(2)_2$ criticality ($c = \frac{3}{2}$), 1 次転移] が可能であり、密度波相 (Mott 絶縁相) から異なる種類の密度波相 (Mott 絶縁相) への量子相転移は Gaussian criticality ($c = 1$) を示すことを明らかにした。ここで c はセントラル・チャージを示す。以上の結果をまとめると図 2 が得られ、2 鎖梯子系の基底状態を統一的にまとめることが可能となる。

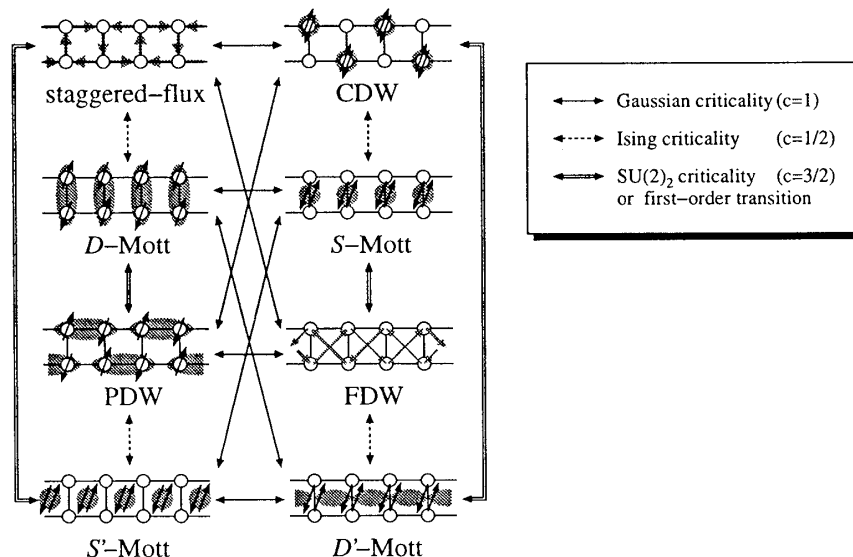


図 2: 梯子格子系における実現可能な基底状態と量子相転移の臨界現象の分類。

参考文献

- [1] M. Tsuchiizu and A. Furusaki, Phys. Rev. Lett. **88** (2002), 056402.
- [2] M. Tsuchiizu and A. Furusaki, Phys. Rev. B **66** (2002), 245106.