

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月6日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540359

研究課題名（和文）銅酸化物超伝導体における「2ギャップ問題」の変分法および BdG 方程式を用いた研究

研究課題名（英文）Study of twp-gap problem of cuprate superconductors using variation method and BdG equation

研究代表者

横山 寿敏 (YOKOYAMA HISATOSHI)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：60212304

研究成果の概要（和文）：銅酸化物超伝導の機構解明に重要な擬ギャップと d-波超伝導について、ハバード模型に対して主に変分モンテカルロ法を適用し、系統的な研究を進めた。ハーフフィリング近傍の電子密度で電子間相互作用を強めると、各状態ともバンド幅程度でモット転移に対応したクロスオーバーを起こす。弱相関側は通常のフェルミ液体（BCS 超伝導）、強相関側は単一占有とダブロン-ホロン束縛が支配するドーブされたモット絶縁体である。銅酸化物の様々な性質は後者でないと説明できない。

研究成果の概要（英文）：With cuprates in mind, we systematically studied properties of pseudogap and d-wave superconductivity, which are keys to clarify the mechanism of high-Tc cuprates. We mainly applied a variational Monte Carlo method to the Hubbard model. Near half filling, as the interaction strength is increased, every state exhibits, at approximately the band width, a crossover closely related to the Mott transition at half filling. The weakly correlated regime corresponds to a Fermi liquid (BCS superconducting) phase, and the strongly correlate regime to a doped Mott insulating phase, in which physics is dominated by singly occupied sites and the doublon-holon binding effect. Properties of cuprates are consistent to those in the latter regime.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：超伝導、銅酸化物、擬ギャップ、変分法、クロスオーバー、モット絶縁体

1. 研究開始当初の背景

(1) ①銅酸化物高温超伝導体の少量ドーブ域で見られる擬ギャップ現象は、超伝導機構を解明する上で重要な鍵と考えられている。従来、転移温度以上で顕著な擬ギャップは、ボ

ース-アインシュタイン凝縮型超伝導で見られるような、ノーマル状態で生成した非コヒーレントなクーパーペアによるものと見なされていた。

② ところが、ラマン分光や光電子分光の実

験で、超伝導ギャップと擬ギャップの振る舞いは、低ドーピング域で正反対であったり、また後者は波数空間中 ($\pi, 0$) 点近傍のみで増大することが判ってきたため、これら2者は全く別の起源で起こっている可能性が高まった。所謂2ギャップ問題である。

(2) 一方、少量ドーピング域において STS/STM でギャップの大きさを測定すると、実空間中で、ギャップが大きい空間と小さい空間がモザイク状に存在することが指摘され、擬ギャップの起源は銅酸化物に必然的に存在する不均一性なのではないかという見解が重要視されていた。

(3) この問題を包括的に説明しうる理論が俟たれていた。

2. 研究の目的

(1) 上記背景で述べた問題、すなわち銅酸化物の超伝導機構を解明する鍵となる擬ギャップの成因を理解するために、最近行われた ARPES などの実験 [波数空間の ($\pi, 0$) 点近傍で出現し超伝導とは無関係 (2ギャップ問題)] と STS/STM の実験 [CuO₂ 面は不均一で異なるギャップの大きさの微視的領域が乱雑に分布] というそれぞれ波数空間と実空間での結果を自然に説明する微視的理論が必要である。そこで、強相関不均一系の電子状態を両空間に渡って調べるため、拡張グッツヴィラー近似とボゴリューボフ-ドゥジャン(BdG)方程式を併用し、様々な乱れが両空間にどのような電子状態を実現するかを系統的に調べる。この方法で不足する局所相関の精確な扱いを変分モンテカルロ法により導入して計算の信頼度を上げ、擬ギャップと系の不均一性の関係を明らかにする。

(2) 当初このような目的で研究を実行し始めたが、その初期の段階で、STS/STM の実験では、系の不均一性 (ドーパントの入った位置など) と実空間でのギャップの大きさの対応は付かないという結果が出された。この結果を我々は重く受け止め、2年目以降、研究目的をより本質的なものに修正し、擬ギャップの起源について不均一性を前提とせずに考えることにした。まず、重要な点は銅酸化物は強い電子相関が本質的と考えられるので、ハバード模型で相互作用強度を変えたときに、どのような物理的特徴を示すのか、初年度の研究を拡張して徹底的に調べることとした。超伝導状態と (もし超伝導相と違う起源なら) 擬ギャップを生じさせると思われる状態の詳細なパラメーター依存性を調べ、それらを基に銅酸化物の少量ドーピング域の物理を解明することを目差した。

3. 研究の方法

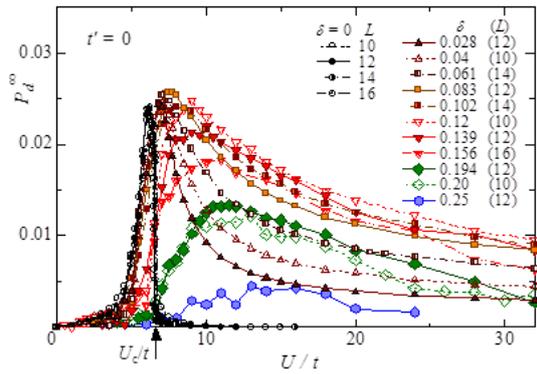
(1) 当初、実空間での不均一性を重要視して次の方法を計画していた。まず均一な t - J モデル (含 t' , t'') に以下のような様々な乱れを導入する: (a) 単一サイト (と結合するボンド) のみ変数 (t' , J など) を変える; (b) 多数の不均一サイトを考え、様々な不純物配置 (パターン) で変数を変え; (c) 変数の強度を乱雑にする。これらの系に対して拡張グッツヴィラー近似 [くり込み因子は変分モンテカルロ (VMC) 法で決定] を適用して一体化し、不均一な超伝導状態を扱うボゴリューボフ-ドゥジャン方程式を大きな系で解いて局所状態密度 (ギャップ)、運動量分布などを計算する。さらに VMC 法で一重項状態を重ね合わせた最適化不純物状態を作り、両空間でのギャップの関係を精査する。

(2) 初年度にはこの計画を実施すべく、均一系に対して、ハミルトニアンのパラメーター値の関数としてギャップがどのように変化するかを VMC 法で詳細に調べた。第二年度以降は、修正した目的に対応して、初年度の方法を拡張し、様々な物理量 (超伝導相関関数など) の計算を d -波超伝導状態、反強磁性状態、フェルミ液体 (ノーマル) 状態に対し、より広範なパラメーター領域で行った。波動関数には (ドーピングされた) モット絶縁域を記述するには不可欠なダブロン-ホロン (D-H) 束縛因子を導入した。また、最終年度には超伝導状態とは別の擬ギャップを出しうる状態、具体的には交替フラックス状態を調べ始めた。

4. 研究成果

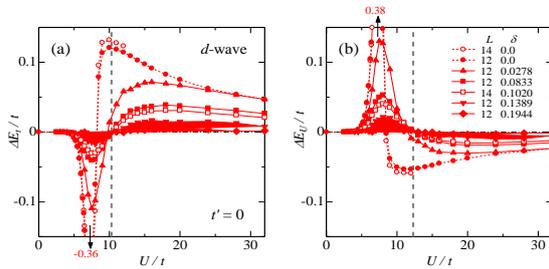
(1) 結果は多岐に渡るため、詳細は文献を参照してもらうことにして、ここではその主要な部分に絞って具体的な結果を紹介し、研究成果全体を象徴させることにする。

(2) 弱相関-強相関クロスオーバー: 銅酸化物が取り得る電子密度 (ドーピング率: δ) に対して、様々な物理量の相互作用強度 (U/t) 依存性を詳細に調べた。ここでは $t' = 0$ の場合に限る。 d -波超伝導波動関数で計算した超伝導ペア相関 P の U/t 依存性を次図に示した。この量は超伝導の強さを表すと考えてよい。図には様々なドーピング率の結果を描いてある。黒の印はハーフフィリングのデータで、小さな U/t 値では微小な値だが、 U_c (モット転移点) に近づくにしたがって急速に増大し、モット絶縁体に対応して、 $U > U_c$ で P は実質的に消失する。ドーピングした場合 ($\delta > 0$) も弱相関域 ($U < U_c$) では P はやはり銅酸化物とは相応しない微小な値だが、 $U > U_c$ では安定した超伝導が出現することが判る。このドーピングされたモット絶縁体 (DMI) の領域で、 P の δ 依存性を調べると



最適ドーピング率周辺を頂点としたドーム型になっている。これは銅酸化物の T_c や凝縮エネルギーの結果と一致する。また、この領域で超流動密度 ρ_s を計算すると δ に比例し、これは銅酸化物で得られている所謂植村プロットと一致する。一方、弱相関域 ($U < U_c$) では P も δ も定量的のみならず、定性的に異なった振る舞いをする。従って、銅酸化物は従来のフェルミ液体やBCS超伝導の領域には存在しないことが判る。

(2) クロスオーバーでの変化: 上記クロスオーバーが起こる相互作用値 U_{co} は P が最大を取る U の位置で大凡決められる。 U_{co} で変分変数にはそれぞれ大きな変化があるが、特にD-H束縛因子は、DMIの領域ではダブロンとホロンがほとんど完全に束縛される値を取る。また、ダブロン密度は非常に低い値であり、ドーピングされたキャリアが占めるサイト以外はほぼ単一占有の状態であるので、それらが占める領域は母物質のモット絶縁体と同等である。超伝導相での中性子散乱の信号が局在化したスピンからのものだという実験結果はこうした状況を反映していると思われる。興味深いことに、安定した超伝導が現れる領域は、D-H対が強く束縛される領域と綺麗に一致している。従って、DMIという状況が超伝導を安定化させる条件と見て良さそうに思われる。

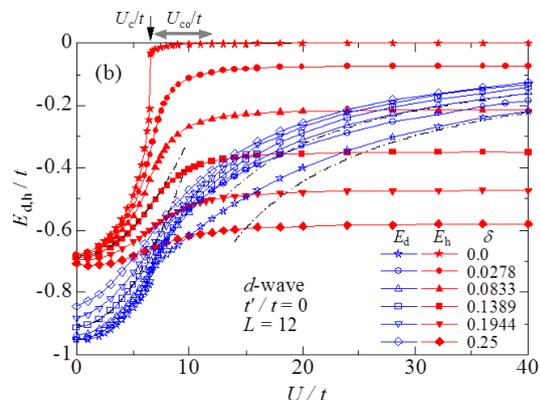


U_{co} で物理量は定性的変化をする。その一例として、超伝導転移の駆動エネルギーの変化を考える。系の電子エネルギーを運動エネルギー E_{kin} と相互作用エネルギー E_{int} に分け、それぞれの超伝導転移で損得を計算したものを上図に示した。 $\Delta E > 0$ のときは、超伝導状態

がノーマル状態よりエネルギーが低く、超伝導転移によって状態が安定化したことを示している。左図は ΔE_{kin} 、右図は ΔE_{int} である。 $U < U_{co}$ では ΔE_{kin} の損失を ΔE_{int} が補って全エネルギーが特をして超伝導状態が安定化している。これは、従来のBCS超伝導体と同様である。一方、DMIの領域では、状況が逆になっていて、運動エネルギーが超伝導転移を駆動している。従って、超伝導転移の機構は U_c で基本的に変わることになる。運動エネルギー駆動の相転移はこの場合だけでなく、反強磁性転移や引力ハバード模型の超伝導でも見られることから、強相関領域では一般的な機構なのであろう。

(3) 電気伝導機構の変化: もう一つ重要な U_{co} での変化を取り上げよう。そのためにまず運動エネルギーを、ダブロン数を変化させるプロセスの寄与 E_d と変化させないもの E_h に分解しよう ($E_{kin} = E_d + E_h$)。 E_d はD-H対が生成消滅するプロセスから、 E_h は独立したホロン (電子ドーピングの場合はダブロン) がホッピングするプロセスから得られる。

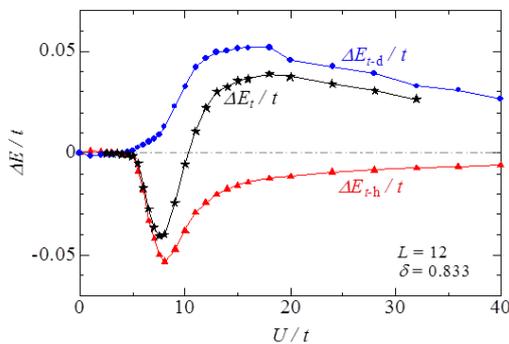
下図に超伝導状態での E_d (青) と E_h (赤) の U 依存性を6つのドーピング率について示した。ノーマル状態や反強磁性状態も基本的には同様の振る舞いをする。まずDMI領域 ($U > U_{co}$) を考えよう。星印のハーフフィリングの場合、孤立したホロンが消失することから $E_h = 0$ である。一方、 E_d は $\sim -4t^2/U$ ($=J$) という有限の値を取るが、 $\delta = 0$ では絶縁体であるということが



判っているので、このプロセスは伝導に寄与しない。 $\delta > 0$ となった場合、 E_d の絶対値は多少変化するが、これはダブロン数の変化と共に変化しているだけで、 $E_d \sim -4t^2/U$ という振る舞いは変わらない。従って、 E_d は $\delta > 0$ の場合も伝導に寄与しないであろう。一方、 E_h の値は U/t の値にはほとんど依存せず、 δ に比例して増大してゆく。前述したように超流動密度は δ に比例するが、その超流動を担っているのは E_h のプロセス (すなわちドーピングホール) であることが判る。これらは他ならぬ t - J 模型のメカニズムであり、 E_h は t 項に E_d

はJ項 (+3サイト項) に対応している。

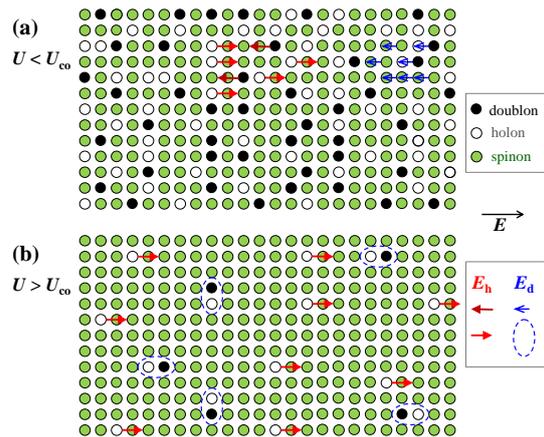
以上から、DMIの領域で存在するホロンは2種類あってD-Hペアとして現れるものと、ドーパされたものであるが、その役割は全く違うのである。その役割を明確にするためにEdとEhの超伝導状態とノーマル状態の差を考えよう。8%程度ドーパした場合のU/t依存性を下図にプロットした。 ΔE_{kin} , ΔE_{int} の損得を議論したときと同様に、 $\Delta E > 0$ ならば超伝導状態で得ることを示す。 ΔE_d はU/tの全領域でエネルギーを得しているのに対し、 ΔE_h は全領域でエネルギーが損失している。つまり、DMI領域では、D-Hの生成消滅過程でエネルギーを稼ぎ、その稼いだエネルギーでそれとは別のキャリアがエネルギーをロスしながらもカレントを運んでいるのである。



これはBCSの描像と大きく異なる。一つ前の図に戻って $U < U_c$ の領域のEdとEhの振る舞いを見てみると、共に $(U/t)^2$ に比例した振る舞いをしている(絶対値の違いはプロセス数の違いと考えてよい)。つまり、この領域では通常の大きなフェルミ面近傍の全ての電子が、周囲の電子配置に拘わらず運動エネルギーに寄与しており、全電子が電流を運んでいることになる。ただし、ここではエネルギーは相互作用部分が稼いでおり、運動エネルギーはトータルでロスとなっている。

(4) 伝導機構: 以上から U_c を境に伝導の様子は大きく変わることが判った。それを下図に模式的にまとめた。弱相関領域(a)ではあらゆる電子が周囲の電子配置とは関係せずにキャリアとなって電荷を運ぶことができる。超伝導は相互作用エネルギーを得するために現れる。一方、DMI領域(b)ではドーパされたホールまたは電子のみがキャリアとなって電流を運ぶ。それらの電子はエネルギーを損失している。エネルギーを稼ぐのはD-H生成消滅過程のダブルロンとホロンであるが、こちらは電流に寄与しない。こうして電流を運ぶホロンとエネルギーを獲得するホロンは別のものであるという奇妙なことが起きている。

(5) 擬ギャップを示す交替フラックス状態: 最後に、話を擬ギャップに戻そう。擬ギャップを超伝導とは直接関連しない別の状態からの



寄与が成因と考える研究者も多い。例えば交替フラックス状態を候補に挙げた研究は古くから数多くある。ただし、この状態はt-J模型ではフェルミ液体状態に比べて大きく安定化することが判っているが、ハバード模型では不安定であるという研究ばかりであった。強相関極限での両モデルの接続性から、これは大きな矛盾であり、解決する必要がある。

このプロジェクトでは、最終年度の後半、擬ギャップの様々な性質(例えばアンチノード領域でギャップを、ノード領域でフェルミアークなどの明確なフェルミ面を示す)を満たす交替フラックス状態 Ψ_{SF} (特に安定性)をVMC法で調べた。カレントがある状態に必須となる局所電子配置に依存した位相因子を Ψ_{SF} に適合するように導入し、その挙動を調べた。その結果、ハバード模型でも Ψ_{SF} は安定化されることが判った。これらの成果は、今後発表する予定で、さらにこの線で研究を発展させる計画である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

① K. Kobayashi, H. Yokoyama, Coexistence of superconductivity and antiferromagnetism and its effects on crossover as to correlation strength in Hubbard model, Phys. Proc. 45 (2013) 17. DOI: 10.1016/j.phpro.2013.04.041. 査読有

② S. Tamura, H. Yokoyama, Variational study of Mott transition by means of Drude weight and superfluid density, Phys. Proc. 45 (2013) 5. DOI: 10.1016/j.phpro.2013.04.038. 査読有

③ H. Yokoyama, S. Tamura, K. Kobayashi, M. Ogata, Variational study of conduction in doped Mott insulator in terms of kinetic

energy, Phys. Proc. 45 (2013) 9. DOI: 10.1016/j.phpro.2013.04.039. 査読有

④ H. Yokoyama, M. Ogata, Y. Tanaka, K. Kobayashi, H. Tsuchiura, Crossover between BCS Superconductor and Doped Mott Insulator of d-wave Pairing State in Two-Dimensional Hubbard Model, J. Phys. Soc. Jpn. 82, 014707 (2013). DOI: 10.7566/JPSJ.82.014707. 査読有

⑤ S. Tamura, H. Yokoyama, Variational Monte Carlo Study of Spin-Gapped Normal State and BCS-BEC Crossover in Two-Dimensional Attractive Hubbard Model, J. Phys. Soc. Jpn. 81, 064718 (2012). DOI: 10.1143/JPSJ.81.064718. 査読有

⑥ Y. Toga, H. Tsuchiura, M. Yamashita, K. Inaba, H. Yokoyama, Mott Transition and Spin Structures of Spin-1 Bosons in Two-Dimensional Optical Lattice at Unit Filling, J. Phys. Soc. Jpn. 81, 063001 (2012). DOI: 10.1143/JPSJ.81.063001. 査読有

⑦ H. Yokoyama, S. Tamura, T. Miyagawa, K. Kobayashi, M. Ogata, Strongly correlated nature of d-wave superconductivity in cuprates. ", Phys. Proc. 27, 60 (2012). DOI: 10.1016/j.phpro.2012.03.410. 査読有

⑧ S. Tamura, H. Yokoyama, Spin-gapped wave function as normal state in attractive Hubbard model, Phys. Proc. 27, 76 (2012). DOI: 10.1016/j.phpro.2012.03.414. 査読有

⑨ H. Yokoyama, T. Miyagawa, M. Ogata, Effect of Doublon-Holon Binding on Mott transition---Variational Monte Carlo Study of Two-Dimensional Bose Hubbard Models, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 084607 (2011). DOI: 10.1143/JPSJ.80.084607. 査読有

⑩ H. Yokoyama, T. Miyagawa, M. Ogata, Mechanism of superfluid-insulator transition in two dimensional Bose Hubbard model, Physica C 471, 730-734 (2011). DOI: 10.1016/j.physc.2011.05039. 査読有

⑪ T. Miyagawa and H. Yokoyama, Effects of Long-Range Correlations on Nonmagnetic Mott Transitions in Hubbard model on Square Lattice, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 084705 (2011). DOI: 10.1143/JPSJ.80.084705. 査読有

⑫ T. Miyagawa, H. Yokoyama: Doublon-holon-binding mechanism of Mott transition in low dimensional Hubbard model. Physica C 471, 738-742 (2011). DOI: 10.1016/j.physc.2011.05.041. 査読有

⑬ K. Kobayashi, H. Yokoyama, Superconductivity and antiferromagnetism in phase diagram of frustrated Hubbard model within variational study Physica C 470, 1081-1084

(2010). DOI: 10.1016/j.physc.2010.05041. 査読有

⑭ T. Watanabe, H. Yokoyama, K. Kobayashi, Antiferromagnetism and pairing symmetries in two-dimensional t-J model, Physica C 470, S106 (2010). DOI: 10.1016/j.physc.2009.12.061. 査読有

⑮ K. Kobayashi, T. Watanabe, H. Yokoyama, Competition and coexistence of antiferromagnetism and superconductivity in the Hubbard model, Physica C 470, S947 (2010). DOI: 10.1016/j.physc.2009.10.058. 査読有

⑯ H. Yokoyama, M. Ogata, K. Kobayashi, Close Relation between Antinodal Fermi-Surface Effect and Superconductivity in Cuprates, Physica C 470, S149 (2010). DOI: 10.1016/j.physc.2009.10.029. 査読有

[学会発表] (計 25 件)

① 横山寿敏、田村駿、小林憲司、小形正男、斥力ハバード模型における弱相関-強相関クロスオーバー、日本物理学会第68回年次大会、2013年03月29日、広島大学

② 渡邊努、横山寿敏、宮川智章、小形正男、キャリアドーピングした三角格子ハバード模型における超伝導状態の計算、日本物理学会第68回年次大会、2013年03月29日、広島大学

③ 小林憲司、横山寿敏、ハバード模型における超伝導と反強磁性の共存・競合関係、日本物理学会第68回年次大会、2013年03月29日、広島大学

④ 田村駿、横山寿敏、Mott 絶縁体領域における波動関数の局在長とドローデの重み、日本物理学会第68回年次大会、2013年03月26日、広島大学

⑤ H. Yokoyama, S. Tamura, K. Kobayashi, M. Ogata, Effect of short-range antiferromagnetic correlation on doped Mott insulators, 25th International Symposium on Superconductivity, 2011年12月05日、船堀タワーホール (東京)

⑥ S. Tamura, H. Yokoyama, Variational Monte Carlo study of Drude weight and superfluid density in Mott-insulating regime, 25th International Symposium on Superconductivity, 2011年12月05日、船堀タワーホール (東京)

⑦ K. Kobayashi, H. Yokoyama, Superconductivity and Mott correlated state in the two-dimensional Hubbard model within a variational study, 25th International Symposium on Superconductivity, 2011年12月05日、船堀タワーホール (東京)

⑧ 横山寿敏、田村駿、小林憲司、小形正男、斥力ハバード模型における弱相関-強相関クロスオーバー、日本物理学会 2012 年秋季大

会、2012年09月20日、横浜国立大学

⑨ 田村駿、横山寿敏、斥力ハバード模型におけるBCS-BECクロスオーバーの可能性、日本物理学会2012年秋季大会、2012年09月19日、横浜国立大学

⑩ 横山寿敏、田村駿、小林憲司、小形正男、ドーブされたモット絶縁体の性質、日本物理学会第67回年次大会、2012年03月24日、関西学院大学

⑪ 田村駿、横山寿敏、2次元引力ハバード模型におけるBCS-BECクロスオーバー2、日本物理学会第67回年次大会、2012年03月24日、関西学院大学

⑫ 小林憲司、横山寿敏、強相関電子系における電荷揺らぎ相関の効果、日本物理学会第67回年次大会、2012年03月24日、関西学院大学

⑬ 梅裕太、土浦宏紀、山下眞、横山寿敏、光格子中S=1ボース原子気体の非整数フィリングにおけるスピン状態、日本物理学会第67回年次大会、2012年03月25日、関西学院大学

⑭ H.Yokoyama, T.Miyagawa, S.Tamura, K.Kobayashi, M.Ogata, Effect of short-range antiferromagnetic correlation on doped Mott insulators, 24th International Symposium on Superconductivity, 2011年10月26日、船堀タワーホール(東京)

⑮ S.Tamura, H.Yokoyama, T.Miyagawa, Variational Monte Carlo study of BCS-BEC crossover and pseudogap in two-dimensional attractive Hubbard model, 24th International Symposium on Superconductivity, 2011年10月26日、船堀タワーホール(東京)

⑯ 横山寿敏、田村駿、宮川智章、小林憲司、2次元ハバード系でのd波一重項と反強磁性の相互関係、日本物理学会2011年秋季大会、2010年09月23日、富山大学

⑰ 田村駿、横山寿敏、2次元引力ハバード系におけるBCS-BECクロスオーバー、日本物理学会2011年秋季大会、2010年09月21日、富山大学

⑱ 梅裕太、土浦宏紀、山下眞、横山寿敏、2次元S=1ボース・ハバードモデルの多重占有モット絶縁相近傍における量子相転移、日本物理学会2011年秋季大会、2010年09月21日、富山大学

⑲ 横山寿敏、宮川智章、小形正男、ドーブされたモット絶縁体としてのd波一重項波動関数と銅酸化物、日本物理学会第66回年次大会、2011年03月26日、新潟大学(震災で中止されたが講演は概要集で成立)

⑳ 宮川智章、横山寿敏、ダブロン-ホロン束縛関数によるモット転移記述の再考、日本物理学会第66回年次大会、2011年03月28日、新潟大学(震災で中止されたが講演は概要集

で成立)

㉑ H.Yokoyama, T.Miyagawa, M.Ogata, Mechanism of superfluid-insulator transition in two-dimensional Bose Hubbard model, 23rd International Symposium on Superconductivity, 2010年11月3日、エポカル筑波

㉒ T.Miyagawa, H.Yokoyama, Doublon-holon binding mechanism of Mott transition in low dimensional Hubbard model, 23rd International Symposium on Superconductivity, 2010年11月3日、エポカル筑波

㉓ 横山寿敏、宮川智章、小形正男、ダブロン-ホロン相関によるモット転移機構の再考、日本物理学会2010年秋季大会、2010年09月24日、大阪府立大学

㉔ 宮川智章、横山寿敏、変分法による低次元ハバードモデルにおけるモット転移の機構、日本物理学会2010年秋季大会、2010年09月24日、大阪府立大学

㉕ 梅裕太、土浦宏紀、山下眞、横山寿敏、スピン1の2次元ボース・ハバードモデルにおけるモット転移とスピン相関、日本物理学会2010年秋季大会、2010年09月24日、大阪府立大学

[その他]

ホームページ等

<http://www.cmppt.phys.tohoku.ac.jp/~yoko/yoko.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山 寿敏 (YOKOYAMA HISATOSHI)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：60212304

(2) 連携研究者

小形 正男 (OGATA MASAO)
東京大学・理学系研究科・教授
研究者番号：60185501

土浦 宏紀 (TSUCHIURA HIROKI)
東北大学・工学研究科・准教授
研究者番号：30374961