

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05428

研究課題名(和文)新アルゴリズムの変分モンテカルロ法によるモット物理が本質的な系の励起状態の研究

研究課題名(英文)Variational Monte Carlo study using new algorithm of excited states in Mott regime

研究代表者

横山 寿敏 (Yokoyama, Hisatoshi)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：60212304

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：粒子間に強い相互作用が働く系で基底状態(絶縁体)と励起状態の間にエネルギーギャップが開いている場合を考える。ギャップを超える励起を行った場合、励起状態が弱い緩和過程を経た後の準定常状態ではどのような性質を持つか、通常基底状態に用いる変分モンテカルロ法を励起状態向けに発展させて調べた。その結果、常磁性状態や対生成した状態は弱い励起強度で(超)伝導性を持つ状態に相転移するが、反強磁性状態は強い励起強度まで絶縁体のままであり、最も安定した状態であった。したがって、励起直後に現れる伝導性が緩和された後には、基底状態と似た反強磁性状態に定常状態として落ち着くだろう。

研究成果の学術的意義や社会的意義

強い電子相関がある絶縁体の励起後の緩和過程に対応する理論的研究として、動的研究より基礎的な点を明らかにすることで、光励起や光学格子の実験結果を深く追求できる素地ができたと考えられる。通常、励起後の緩和した状態が金属的になるのが当然と考えられているが、モット領域であれば、それが誤解であることを示せた。励起に関しても、半導体の物理のモットの物理が著しく異なることを示せた。主流である動的研究に、本研究の成果は反映される必要がある。

研究成果の概要(英文)：We consider a strongly correlated system in which an energy gap exist between the insulating ground state and excited states. By applying a variational Monte Carlo method, which is often used for ground states, to excited states, we studied how the excited state behaves as a quasi-stationary state after some weak relaxation processes. We found that the pair-formed and paramagnetic states exhibit phase transitions to (super)conducting states with weak excitation strengths, whereas the antiferromagnetic (AF) state preserves an insulating state. The energy is lowest for the AF state. Therefore, after relaxation from an initial transient conductive state, the state becomes an AF state, which is similar to the ground state.

研究分野：物性理論

キーワード：強相関電子系 モット転移 ハバード模型 変分モンテカルロ法 反強磁性状態 超伝導状態 光励起 冷却原子

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

モット (金属-絶縁体) 転移は運動エネルギーと相互作用エネルギーの競合によって起こるが、その周辺では多様な磁気秩序、異方的 (高温) 超伝導や巨大磁気抵抗効果などの興味深い現象が現れ、活発な研究が展開されている。特に近年、超高速パルスレーザー光を用いて、系を平衡 (基底) 状態から励起 (非平衡) 状態に上げる際に起こる顕著な状態変化 (相転移など) と励起状態からの緩和過程の研究が注目されている。こうした光励起による動的な性質の研究から、平衡状態の研究では得られなかった新しい現象 (知見) が次々と見出された。例えば、常伝導状態→超伝導状態や絶縁体→金属状態などのより高い伝導状態への転移や、緩和過程の研究から定常状態からは得られなかった対称性の破れなどの特異な性質、などが見出された。

モット絶縁体の領域において電荷移動ギャップを跨ぐ励起は、光照射や光学格子上の冷却原子系で得られている。この励起では、単一占有されたサイト間で電子が移動し、二重占有サイト (ダブルオン, D) と空サイト (ホロン, H) が生じる ( $\uparrow\cdots\downarrow\rightarrow D\cdots H$  など) と考えられるが、実験的には励起された初期状態やそれから少し緩和が進んだ準定常状態の電子配置などの詳細は未解明である。

理論的な面では、光励起過程と励起状態からの緩和機構を扱う動的な研究は数多く為されてきたが、より基礎的な励起状態を (準) 定常状態として扱う研究は数が少なく、未解明の問題が多数あった。例えば、(i)モット絶縁体にどのくらいの強度の光を照射すれば導体化するかとか、(ii)導体化の相関強度依存性はどうか、(iii)特定の光強度励起で相互作用がある場合どのような状態 (相) が安定か、などである。

### 2. 研究の目的

モット物理系は強相関であり、さらに様々な相転移を内包する系なので、平均場近似や摂動展開などの常套的な方法では扱えない。これまで、定常状態として静的に励起状態を扱った研究として、ハバード模型の励起状態に対する有効模型に厳密対角化法を適用し、20サイト以下のごく小さな系の性質を調べた一連の研究がある。例えば、D-H 対が励起された状態では、D-H 束縛効果が全くなくなるなどの興味深い結果が得られていた。

しかし、これらの研究には大きな問題が2つある。有効模型を用いる点と系のサイズ依存性が論じられない点である。ハバード模型では基底状態に既に D-H 対が存在し、D-H 束縛効果は特に弱相関側が伝導性である (金属や超伝導) 状態で著しい。励起状態においては基底状態に既に D-H 対と新たに励起された D-H 対の見分けがつかないはずである。有効模型では基底状態に D-H 対は存在しないため、励起状態と連続的に繋がらないのである。また、1つの D-H を励起すると、全サイトの 10%が励起された状態になってしまい、また最も遠いサイト間でも  $5^{1/2}a$  ( $a$ : 格子定数) であり、熱力学極限を考えるのが難しい。

本研究では、これらの難点を克服する方法として、これまで強相関系の基底状態や低エネルギー励起状態に対して数多くの成果を収めてきた**変分モンテカルロ (VMC) 法**を直接ハバード模型の励起状態に適用し、上記の理論で不分明な点を明らかにし、さらに実験と対応する上記(i)-(iii)で挙げた問題などの答えを見出す。VMC 法は局所的相関因子を厳密に扱うことができ、弱相関から強相関までモット転移も含めて定量的な計算が可能な数少ない方法である。

### 3. 研究の方法

本研究では変分原理に則った VMC 法を用いて、ハバード模型のモットギャップを超えた高エネルギー励起状態を扱う。通常変分法は基底状態に適用されるが、試行関数に励起状態特有の拘束条件を加えて最適化すれば、その範囲内で最も安定な状態を見つけることができる。本研究の目

的に合わせた拘束条件は、全ダブロン数  $D$  に下限  $D_L$  を設定し、 $D \geq D_L$  の空間で VMC 計算を行えばよいことが解る。ちなみに  $D_L=0$  ならば従来の基底状態を求める計算となる。系のサイト数を  $N_s$  として、ダブロン密度  $d=D/N_s$  やその下限  $d_L=D_L/N_s$  を定義する。 $D_L$  は  $U/t \rightarrow \infty$  だと励起によって作られたダブロン数（吸収された光子数に対応）と厳密に一致する。有限の  $U/t$  の場合、計算の結果から見ると、強相関域では大まかにはそれが正しいことが解った。したがって励起の強さ（光強度）は  $d_L$  で決められる。例えば銅酸化物では  $\text{CuO}_2$  面の Cu 原子一個あたりに吸収される光子数が  $d_L$  である。ここでは便宜上、 $d_L \leq 0.06$  を弱励起、 $0.06 \leq d_L \leq 0.14$  を中励起、 $d_L \geq 0.14$  を強励起と呼ぶことにする。

今模型のパラメーター（相互作用強度  $U/t$  や電子密度  $n$  など）を固定して  $D_L$  を与えて最適化し、様々な物理量の期待値  $Q$  を  $d$  の期待値と共に求めれば、 $Q$  を  $d$  の関数としても表せる。 $d_L$  或いは  $d$  を用いれば、基底状態から連続的に（光強度の変化に対応する）励起状態の性質を考えることができる。本研究では、銅酸化物高温超伝導体の母物質の光励起を念頭に置いて、ハーフフィリング ( $n=1$ ) の正方格子 ( $L \times L$  サイト,  $L=10-16$ ) に対し、常伝導（常磁性、PM）、反強磁性（AF）、 $d(x^2-y^2)$ -波超伝導 ( $d$ -SC) の各状態の励起状態について、特に  $U/t$  依存性と  $d$  依存性を中心に調べた。さらに最近研究されている  $\eta$  ペアリング（一種の  $s$  波超伝導状態）に関連し、通常の  $s$  波、拡張  $s$  波の超伝導状態の安定性も計算した。

#### 4. 研究成果

(1) **基底状態の性質**：励起状態の計算を行う前に、基底状態の性質をよく知っておく必要がある。そこで  $D_L=0$  の場合について次のような改良を行って、各相の最適化基底状態を求めた。ここでは  $n=1$  の場合について記す。

① **バンドくりこみ効果**：これまで自己エネルギー補正に対応するバンド（フェルミ面）のくりこみ効果（BRE）を系統的に入れた計算が無かったので、一体状態のバンドを強束縛近似で第5近接サイトまでの遷移積分を導入した。以下の結果を得た。

(i) 各相の状態ともハミルトニアンに導入した対角方向の遷移積分  $t'$  は、少なくとも  $|t'|/t \leq 0.5$  の範囲ならば、 $|t'|/t=0$  の最適化状態に還元されることが解った。したがって、各相のエネルギーは  $U/t$  の値によらず  $E_{AF} \leq E_{d-SC} \leq E_{PM}$  となり、基底状態は常に AF 状態である。

(ii)  $|t'|/t=0$  の場合は、BRE を導入しても  $U/t$  依存性はほとんど変わらない。すなわち、 $d$ -SC 状態は  $U/t \sim 5$  から急激に超伝導秩序が発達し、 $d$ -SC 相関関数  $P_d$  はモット転移点直下でピークを作る。 $d$ -SC 状態は  $U_c/t \sim 6.6$  で、また PM 状態は  $U_c/t \sim 8.5$  でモット転移を起こし、 $U > U_c$  では絶縁体である。ダブロン密度  $d$  は  $U_c/t$  で急激に減少し、特にそのうち電荷キャリアとなる D-H 束縛から解放された自由ダブロン密度  $d_F$  は  $U > U_c$  で消失する。一方、AF 状態は  $U_{AF}/t \sim 3$  で PM 状態（金属）から AF 秩序を持つ状態に移り、 $U > U_{AF}$  では絶縁体である。AF 状態では絶縁体領域でも  $d_F$  は消失せず  $U/t$  の増大すると滑らかに減少する。したがって、AF 状態では D-H 束縛とは異なった機構で、D や H が局在化されていることになる。これらの結果を励起状態の基準として用いる。

(iii)  $s$  波、拡張  $s$  波に対し BRE を導入した計算を行ったが、これらが安定化することなく、常に PM 状態に還元された。

② **不純物効果**：銅酸化物超伝導体は本質的に乱れた系なので、不純物効果について調べておく必要がある。そこで点型の不純物ポテンシャル  $V$  を導入した不純物ハバード模型（IHM）の基底状態に関する計算を行った。IHM はより複雑なアンダーソン-ハバード模型よりも、 $V$  の効果を理解し易い。不純物ポテンシャルが弱い場合 ( $|V| \leq U$ )、 $U/t$  値が 0 から増大すると共に、

急速にポテンシャルは遮蔽され、定性的には  $V=0$  の状態（強相関域なら絶縁体）とほとんど同様の性質を持つ。一方、 $|V| \geq U$  の場合は、モット転移を起こして状態が（超）伝導化し、斥力ポテンシャルの場合は化学的にドーブされた場合の電子ドーブ系、引力ポテンシャルの場合はホールドーブ系と対応する性質を持つ。これらを基にした励起状態の研究にはこれから着手する予定である。

(2) **励起状態の相互作用強度 ( $U/t$ ) 依存性**：相互作用強度が  $U < U_c$  または  $U < U_{AF}$  程度に小さい場合は、弱励起 (PM と  $d$ -SC の場合)、或いは中励起以下 (AF の場合) であるならば、 $d \gg d_L$  なので、 $d_L$  を設定しても波動関数はほとんど影響を受けない。このことから、弱相関系に余り強くない強度の光を照射しても状態は変わらないことになる。強相関域 ( $U > U_c, U_{AF}$ ) ではいずれの状態も基底状態は絶縁体であった。励起によりダブロン数が増加したことによる効果を状態毎にまとめる。

①  **$d$  波超伝導状態と金属状態**：これらの状態は共通点が多いのでまとめて説明する。両状態とも  $U > U_c$  におけるモット絶縁体では自由ダブロン（電荷キャリア）が消失したことによって伝導性を失っていた。ダブロン密度が  $d < d_c$  の場合は依然として状態は絶縁体だが、 $d > d_c$  の場合には自由ダブロン密度  $d_F$  が有限となり伝導状態となる。すなわち  $d = d_c$  がダブロン密度をパラメーターとした場合のモット転移点である。転移点は  $U/t=12$  の場合、 $d_c \sim 0.022$  (PM),  $0.038$  ( $d$ -SC) であり弱励起の範囲内である。 $d_c$  の値は  $U/t=8$  の場合にもほぼ同じなので、強相関域内では  $U/t$  依存性は小さいと思われる。モット転移点を  $d_L$  をパラメーターとして考える場合は、他のモデルパラメーター ( $U/t, L$  など) に依存する。 $U/t$  が大きいほど、 $d_L$  の閾値は大きいので金属化するには強い光強度が必要になる。PM 状態と  $d$ -SC 状態での電荷キャリアは自由ダブロン + 自由ホロンなので、両者の密度の和を  $\delta_{D+H}$  と書くことにする。ドーブによってキャリアを導入した場合（ドーブ率  $\delta=1-n$ ）と励起によってキャリア  $\delta_{D+H}$  を導入した場合 ( $d > d_c$ ) において、 $\delta = \delta_{D+H}$  ならば、様々な物理量 ( $d$ -SC 状態のペア相関関数やスピン構造因子など) の  $U/t$  依存性が極めて似た振る舞いをするのが解った。つまり、励起状態における独立した D と H (同数存在) はキャリアとして、ドーブした電子 (D) またはホール (H) (片方のみ存在) と同じ性質を持っていることになる。

② **反強磁性状態**： $d$ -SC や PM 状態とは違い、AF 状態は中励起以下の励起強度  $d_L$  では金属化しない。これらの  $d_L$  の範囲では  $d_L$  の増大と共に  $d_F$  は増えて行く [AF 相で最大  $d_F \sim 0.038$  ( $d_L \sim 0.14$ ,  $U/t$  にはほとんど依らない)]。したがって密度  $d_F$  の不對ダブロンはキャリアにはなっておらず、D-H 束縛以外の機構で局所化されている。したがって不對ダブロンを自由ダブロンと呼ぶよりは孤立ダブロンと表現する方が相応しい。また秩序変数である交替磁化  $m$  は  $d_L$  の増大と共に漸減して行くが、定性的には基底状態の性質が励起された場合でも残っている。

励起状態のエネルギーの  $U/t$  依存性を 3 つの状態と比べると、 $d_L=0$  の場合は  $U/t=7-8$  で圧倒的に AF が低く  $U/t=20$  付近では AF と  $d$ -SC はほとんど差が無くなり、PM よりは有意に下がっている。ところが、 $d_L$  が増大するに伴い、 $d$ -SC のエネルギーは相対的に上がり、 $d_L=0.04$  では  $d$ -SC は非常に PM に接近し、三者のエネルギー差はほとんど  $U/t$  に依存しなくなる。これより、励起状態（特に低励起から中励起）においては相対的に AF 状態がかなり安定になる。

③  **$s$  波、拡張  $s$  波状態**： $U/t$  および  $d_L$  ( $d$ ) を変化させて調べたが、これらの状態が安定化することはなく、励起状態においても、常に最適化状態は PM 状態であった。

(3) **励起状態の励起強度 ( $d_L$  または  $d$ ) 依存性**：既に  $d_L$  依存性について議論しているが、ここでは強相関域 ( $U > U_c$  または  $U > U_{AF}$ ) で励起強度を変化させた場合の結果を説明する。

①  **$d$  波超伝導状態**：上述のように  $d < d_c$  では絶縁体の状態であるが、 $d > d_c$  において  $d$  をさら

に増大させると、超伝導相関  $P_d$  が発達し中励起領域の  $d \sim 0.09$  で最大値をとった後急速に弱まり、 $d \sim 0.11$  ( $U/t=12$ ),  $0.12$  ( $U/t=8$ ) で消失し PM 状態に還元する。この値  $\delta_{D+H} \sim 0.23$  もキャリアドープ系の場合と概ね一致している。ここでの超伝導機構はやはり通常のドープ系と同様である。すなわち  $d_L$  がゼロから増大するにつれ、対生成ポテンシャル  $\Delta_d$  やその源である波数  $\mathbf{Q}=(\pi,\pi)$  におけるスピン構造因子  $S(\mathbf{Q})$  は単調に減少し、 $\Delta_d$  は  $d \sim 0.11 - 0.12$  で消失する。一方キャリア濃度  $d_F$  やその運動エネルギーは単調に増大する。超伝導強度は  $P_d \sim \Delta_d \times d_F$  として表され、 $d$  の関数としてドーム型になる。

② **反強磁性状態**：弱励起、中励起の領域では AF 状態は常に絶縁体であった。この領域では  $d_L$  の増大と共に交替磁化  $m$  は漸減するが、 $d_L \sim 0.14$  において  $m$  は不連続的に（1次転移が起き）消失し PM 状態に還元される。反強磁性状態は強励起領域で初めて金属化する。交替秩序が壊される転移は、増大した  $2d_F$ （転移点で 7.5%）の運動の効果より、スピンを持たない D と H の密度が転移点では 32%にまで増大することが主因と考えられる。

(4) **研究成果の位置づけ、インパクト、今後の展望**：まず結果をまとめると、最低エネルギー状態で絶縁体である強相関領域の各状態に関し、 $d$ -SC 状態および PM 状態は弱励起で(超)伝導化するが、AF 状態は強励起で漸く金属化する。励起状態のエネルギーは励起強度  $d_L$  を固定した場合、常に AF 状態が安定である。したがって、実際に励起後に  $t$  程度の弱い緩和過程経た後は、強励起でなければ、(準) 定常状態として AF 絶縁体を取るであろう。

強相関系の励起状態を動的に扱う研究は数多いが、準定常状態として静的に考える研究は非常に少ない。励起された D-H 対が  $U$  のスケールのエネルギーを放出して対消滅する前に、充分多くの  $t$  のスケールの過程を経ることが可能である。その過程は系の外部との弱い接触もある。本研究では一定  $D_L$  を仮定した場合の安定解を求めたわけで、散逸のある  $t$  のスケールの過程を充分経た後の準定常状態に対応する。励起状態を動的に扱った研究で、状態の時間発展を考える場合は、エネルギーが保存する方法が主流である。その中で、例えば C.N.Yang 氏が提唱した  $\eta$  ペアリングの状態の研究も盛んに行われている。上記のように  $s$  波の超伝導状態は全く安定化することはないので、 $\eta$  ペアリングはあっても励起後ごく短命な状態であると思われ、最終的な準定常状態としては基底状態と類似した AF 絶縁体状態になるであろう。動的研究は時間依存性を見る実験との対応で重要であるが、計算が大掛かりなので、用いる近似は粗いものが多い。したがって、相補的研究として励起後のより正確な (準) 定常状態の研究は、今後益々重要性が高まるものと思われる。

本研究では均一なハーフフィリング系のみを扱った。本研究の拡張としてキャリアをドープされた系や、特に不純物がある場合の励起状態は重要である。今後の発展が望まれる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 Ryo Sato, and Hisatoshi Yokoyama	4. 巻 87
2. 論文標題 Band-Renormalization Effect on Superconductivity and Antiferromagnetism in Two-Dimensional t-J Model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114003/1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.87.114003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryo Sato, Hisatoshi Yokoyama	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Impurity effects on dx <sup>2</sup> -y <sup>2</sup> -wave superconducting state in strongly correlated Hubbard model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics; Conference Series	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kenji Kobayashi, Hisatoshi Yokoyama	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Relationship between superconductivity and anisotropy in two-dimensional Hubbard model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics; Conference Series	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hisatoshi Yokoyama, Ryo Sato, Kenji Kobayashi	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Impurity induced insulator-to-metal transitions in half-filled Mott insulators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics; Conference Series	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R.Sato, H.Yokoyama	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Interhole correlation and Phase Separation in $t$ - $J$ model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K.Kobayashi, H.Yokoyama, Y.Toga	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Interplay between staggered flux and d-wave superconducting orders in $t$ - $t'$ - $J$ model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 H.Yokoyama, R.Sato, K.Kobayashi	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Impurity-induced Mott transitions in partially filled antiferromagnetic states	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 S.Tamura, H.Yokoyama	4. 巻 81
2. 論文標題 Variational Study of Magnetic Ordered State in d-p Model	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physics Procedia	6. 最初と最後の頁 5-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Y.Toga, H.Yokoyama	4. 巻 81
2. 論文標題 Loop-Current and Antiferromagnetic States in Fermionic Hubbard Model with Staggered Flux at Half Filling	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physics Procedia	6. 最初と最後の頁 13-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 R.Sato, H.Yokoyama	4. 巻 530
2. 論文標題 Band-Renormalization Effect in Coexistent State of d-wave Superconducting and Antiferromagnetic Orders for Hubbard Model	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physica C	6. 最初と最後の頁 5-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K.Kobayashi, R.Sato, H.Yokoyama	4. 巻 81
2. 論文標題 Band-Renormalization Effect on Relationship between Superconductivity and Antiferromagnetism in t-J Model	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physics Procedia	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 H.Yokoyama, R.Sato, K.Kobayashi	4. 巻 81
2. 論文標題 Predominance of Antiferromagnetism in Two-Dimensional Underdoped Hubbard Model	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physics Procedia	6. 最初と最後の頁 9-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 R.Sato, H.Yokoyama	4. 巻 85
2. 論文標題 Band-Renormalization Effect and Predominant Antiferromagnetism in Two-Dimensional Underdoped Hubbard Model	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Physical Socociety of Japan	6. 最初と最後の頁 074701 (1-22)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.85.074701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 H.Yokoyama, S.Tamura, M.Ogata	4. 巻 85
2. 論文標題 Staggered Flux State in Two- Dimensional Hubbard models	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Physical Socociety of Japan	6. 最初と最後の頁 124707 (1-21)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.85.124707	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 R.Sato, H.Yokoyama	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Band-renormalization effects on antiferromagnetism and d-wave superconductivity in two-dimensional t-J model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics Proceedings Series	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K.Kobayashi, H.Yokoyama	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Interplay between staggered flux and d-wave superconducting states in Hubbard Model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics Proceedings Series	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 H.Yokoyama, R.Sato, K.Kobayashi	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Effect of impurity potentials on antiferromagnetism in two-dimensional Hubbard model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics Proceedings Series	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計30件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 佐藤諒、横山寿敏
2. 発表標題 t-J模型におけるホール間相関と二種類の相分離状態
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋期大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山寿敏、佐藤諒、小林憲司
2. 発表標題 強相関ハバード模型における点型不純物ポテンシャルの効果
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋期大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林憲司、横山寿敏
2. 発表標題 強相関電子系における異方性と超伝導状態との関係
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋期大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hisatoshi Yokoyama, Ryo Sato, Kenji Kobayashi
2. 発表標題 Variational approach to impurity problem in Hubbard model---Effect of short-range antiferromagnetic order and one-body screening projector
3. 学会等名 31th International symposium on superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Kobayashi, Hisatoshi Yokoyama
2. 発表標題 Relationship between superconductivity and anisotropy in two-dimensional Hubbard model
3. 学会等名 31th International symposium on superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Sato, Hisatoshi Yokoyama
2. 発表標題 Effect of impurity potential on superconductivity in strongly correlated Hubbard model
3. 学会等名 31th International symposium on superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤諒、横山寿敏
2. 発表標題 強相関超伝導状態に対して不純物ポテンシャルが及ぼす影響
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林憲司、横山寿敏
2. 発表標題 強相関電子系における超伝導、交替磁束秩序、異方性の関係
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山寿敏、佐藤諒、小林憲司
2. 発表標題 強相関ハバード模型における点型不純物ポテンシャルの効果 II
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hisatoshi Yokoyama, Ryo Sato, Yuta Toga, Kenji Kobayashi
2. 発表標題 Rules for coexistence and exclusivity of two long-range orders induced from many-body variation theory
3. 学会等名 International Workshop on Strong Correlation and Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤諒、横山寿敏
2. 発表標題 t-J 模型における J 依存性と相分離
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋期大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林憲司、横山 寿敏
2. 発表標題 強相関極限における交替磁束秩序とd-波超伝導状態の共存・競合関係
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋期大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 多体変分法による2秩序共存/排他性の一般則
2. 発表標題 横山寿敏、佐藤諒、柁裕太、小林憲司
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋期大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hisatoshi Yokoyama, Ryo Sato, Kenji Kobayashi
2. 発表標題 Impurity-induced Mott transition in doped Hubbard model
3. 学会等名 30th International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ryo Sato, Hisatoshi Yokoyama
2. 発表標題 Interhole correlation and Phase Separation in t-J model
3. 学会等名 30th International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kenji Kobayashi, Hisatoshi Yokoyama
2. 発表標題 Interplay between Staggered Flux and d-Wave Superconducting Orders in $t-t'$ -J Model
3. 学会等名 30th International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuta Toga, Hisatoshi Yokoyama
2. 発表標題 Effects of Diagonal Hopping on Loop Currents in Fermionic Hubbard Model
3. 学会等名 30th International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤諒、横山寿敏
2. 発表標題 不純物ポテンシャルが強相関超伝導状態に及ぼす影響
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林憲司、横山 寿敏、梅裕太
2. 発表標題 交替磁束秩序とd-波超伝導状態の共存・競合関係におけるバンド繰り込み効果
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山寿敏、佐藤諒、小林憲司
2. 発表標題 点型不純物ポテンシャルが誘起するモット転移
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小形正男、横山寿敏
2. 発表標題 擬ギャップ状態候補としてのt-JモデルにおけるFlux相
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 佐藤諒、横山寿敏
2. 発表標題 t-J 模型における相図とホールの役割
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 小林憲司、横山寿敏、小形正男
2. 発表標題 交替磁束状態とd-波超伝導状態の共存・競合関係について
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 横山寿敏、佐藤諒、小林憲司
2. 発表標題 乱れが反強磁性及びd-波超伝導状態に及ぼす効果について
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kenji Kobayashi, Hisatoshi Yokoyama
2. 発表標題 Interplay between staggered flux and d-wave superconducting state in Hubbard model
3. 学会等名 29th International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hisatoshi Yokoyama, Ryo Sato, Kenji Kobayashi
2. 発表標題 Effects of impurity potential on antiferromagnetic and d-wave superconducting states in Hubbard model
3. 学会等名 29th International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Ryo Sato, Hisatoshi Yokoyama
2. 発表標題 Band-renormalization effects on antiferromagnetism and d-wave superconductivity in two-dimensional t-J model
3. 学会等名 29th International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 佐藤諒、横山寿敏
2. 発表標題 t-J模型における超伝導と反強磁性の競合に対するバンドくりこみ効果 II
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 横山寿敏、佐藤諒、小林憲司、小形正男
2. 発表標題 ハバード模型における反強磁性状態に対する不純物ポテンシャルの影響
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林憲司、横山寿敏
2. 発表標題 交替磁束状態とd-波超伝導状態の共存・競合関係について II
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>横山 寿敏 ( Hisatoshi Yokoyama )  <a href="http://www.cmpt.phys.tohoku.ac.jp/~yoko/yoko.html">http://www.cmpt.phys.tohoku.ac.jp/~yoko/yoko.html</a></p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----