

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 井戸 康太

これまでの常圧下における超伝導への最高転移温度は銅酸化物で実現された約 130K であるが、この最高転移温度はここ数十年更新されていない。この原因の一つとして、より高い転移温度を生み出すために必要なキャリア間に働く有効引力は、相分離や長周期の電荷秩序などの電荷不均一状態を同時に引き起こしてしまう、ということが挙げられるが、電荷不均一状態と d 波超伝導状態の競合が実際に強相関電子系で多く観測されている。この困難を乗り越えるためには、競合を深く理解したうえで、超伝導を選択的に制御・増大させる方法を考える必要がある。近年、光を用いて物質の格子モードを選択的に励起させる目的の実験で、室温領域でもギャップ形成などの超伝導的な性質が現れることが実験的に報告された。この研究は、従来の熱平衡の枠を取り払って、非平衡性を利用して高温超伝導を実現させる研究を活性化した。一方理論研究を見ると、強相関電子系の特徴である電子間のもともとの強いクーロン斥力相互作用が、創発的に強い有効引力に転換し高温超伝導が実現する機構の解明には、摂動論的な手法、解析的手法に限界があり、計算科学的な手法の役割が大きい。計算科学的な手法の進展により、ようやく最近になって、小さなエネルギースケール差でのストライプなどの電荷不均一状態と d 波超伝導の競合を高い精度で計算する手法が種々の変分関数法（変分モンテカルロ法、密度行列繰り込み群法、テンソルネットワーク法、機械学習）で発展し、異なる手法の結果の一致から、理論有効モデルの範囲内であるが、定量性があり、信頼性のある予測が強相関領域でも可能になってきた。しかしながら、超伝導の選択的な増大のための知見を得るべく、発展してきた高精度手法を活用して現実的なパラメタでの激しい競合を相互作用パラメタ、電子濃度などの依存性にわたって吟味した系統的研究は熱平衡状態や基底状態といえども今までない。また強相関電子系の非平衡状態に至っては、フェムト秒程度のスケールを超えるような時間での信頼ある計算手法が、負符号問題などの困難のためになく、定量的研究は皆無であった。この停滞に対して、論文提出者は修士課程の段階で、時間依存変分原理に基づく時間依存変分モンテカルロ法を開発し、初めて強相関のフェルミ粒子系の長時間高精度計算を可能にしていた。

本研究では、強相関電子系の基底状態における電荷不均一状態と超伝導状態の競合を、電子濃度や相互作用パラメタの依存性を含めて系統的に解明し、この競合の知見から得たアイデアをもとに、論文提出者が新たに開発した手法を活用して、格子モードの詳細によらず、強相関電子系固有の特性と非平衡性を利用した新たな超伝導増大の可能性を提示したものであり、**Superconductivity and spatial inhomogeneity induced by electron correlations in and out of equilibrium** というタイトルで英文で七章からなる。

一章での導入部に続いて、二章では論文提出者が開発した非平衡でのフェルミ粒子系に対する手法を含めて、変分モンテカルロ法のアルゴリズムを解説している。続いて第三章で基本的な強相関電子系の理論モデルである、ハバード模型の量子ダイナミクスを厳密に知られている結果と比較して、開発した手法の精度が高いことを検証した結果を示している。

第四章では基底状態での変分モンテカルロ法を長距離周期を持つスピン/電荷秩序も扱えるように設定し、ストライプ状態、相分離、超伝導の競合を詳細に解明し、2 種類のハバード模型に対して、相互作用

と電子濃度のパラメタ空間で相図とその普遍性個別性を明らかにした。この結果弱結合では秩序がないか非常に弱い金属状態であった基底状態が相互作用の増大とともに急激にストライプや相分離、d波超伝導が競合する状態にクロスオーバーすることを先行研究より詳細に示した。また強結合領域でストライプ状態の周期が電子密度に従って敏感に変化し実験で観測されるストライプ周期も再現すること、かつこの基底状態からわずかな励起エネルギー（銅酸化物に相当するエネルギースケールで 10-100K 程度）で電荷一様な強い超伝導状態が励起状態（準安定状態）として存在することを明らかにした。一方ストライプ秩序を持つ基底状態では 1 次元鎖のジョセフソン結合の描像が成り立ち、超伝導秩序が顕著に抑制されていることを示した。この結果をもとに、光による励起で電荷不均一を抑制できれば励起状態である強い超伝導状態を維持できる可能性があるというアイデアを得た。

第五章ではこのアイデアを基に中間結合領域での電荷一様な基底状態からのレーザー照射で、動的局在化の機構で系を有効的に強結合領域に遷移させ、かつ初期状態の電荷一様な状態を維持して、熱平衡（基底状態）では実現できない強い超伝導秩序を動的に安定化できることを示した。さらに第六章では強結合領域の基底状態であるストライプ状態から始めても、レーザー照射が有効に電荷不均一を溶かし、電荷一様な強い超伝導に動的安定化できることを示し、その機構も明らかにした。また解析結果は、高強度の電場照射によって超伝導秩序が Higgs 振動を伴いながら増大することを示している。第七章は結論と今後の課題に充てられている。

以上、井戸康太提出の本論文は、新たな計算科学的枠組みの開発に成功し、これを用いて非平衡な強相関電子系で超伝導を増幅しうる新しい原理を提唱し、超伝導研究の新しい方向を切り開くとともに、今後の実験検証への動機と示唆を与えた。物性物理学の重要な課題に対して顕著な貢献したものと認められ、物理学および物理工学への寄与は大きい。以上議論した結果、本論文審査委員会は全員一致で本研究が博士(工学)の学位論文として合格であると判定した。

なお本論文は他の研究者との共同研究の部分があるが、論文提出者が主体となった計算、解析において、論文提出者の寄与が、学位授与に当たって十分であることが認められた。