

平成30年6月27日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05181

研究課題名(和文) 量子不純物系の強相関領域での量子臨界点、クロスオーバーの普遍的振舞の研究

研究課題名(英文) Research on universality and crossover near quantum critical points in strongly correlated quantum impurity systems

研究代表者

西川 裕規 (Nishikawa, Yunori)

大阪市立大学・大学院理学研究科・講師

研究者番号：60373239

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：物性が劇的に変化する量子相転移は、量子揺らぎにより引き起こされ、様々な新奇低温物性出現の背後によく底流している。本研究では、強相関領域にある量子不純物系として記述できるいくつかの典型的な系を対象に、これら量子相転移の量子臨界点やその近傍のクロスオーバーにおいて、系の詳細によらない普遍性の出現(対称性の出現)の研究を行った。

主な研究成果として、「通常はゼロとなる量(Luttinger積分)が(半)整数性を伴ってトポロジカル指数となり、量子臨界点により隔てられた相(Fermi液体として普遍的な性質を持つ相)を区別特徴付けること」、「ある対称性(SU(4))が低温で創発する条件」の発見が挙げられる。

研究成果の概要(英文)：We have investigated universality and crossover near quantum critical points in strongly correlated quantum impurity systems. In our investigations, we have considered some typical systems and have analyzed them using the renormalized perturbation theory and the numerical renormalization group calculation.

We have discovered that the Luttinger integral, which was expected zero in a regular Fermi liquid, can take (half-) integer values and can characterize two Fermi liquid phases separated by a quantum critical point, as a topological index. We have also discovered a conditions for observing emergent SU(4) symmetry in a double quantum dot system.

研究分野：物性理論

キーワード：量子臨界点 トポロジカル指数 トポロジカル相転移 Luttinger積分 対称性創発 Kondo効果 Lieb  
磁性 Nagaoka強磁性

## 1. 研究開始当初の背景

物質の性質が劇的に変化する相転移現象は興味深い現象であるが、中でも量子相転移は絶対零度でも量子揺らぎにより引き起こされ、様々な新奇低温物性出現の背後にしばしば底流していると考えられている。これら量子相転移の量子臨界点やその近傍のクロスオーバーにおいて、系の詳細によらない普遍性の出現(対称性の出現)は、とりわけ特徴的で興味深い。

量子相転移現象の舞台の一群として、近年の微細加工技術(ナノテクノロジー)で構築することができる量子ドット等のナノスケール構造体に於ける電子系(これらの系は数個の量子不純物を含む電子系としてモデル化できる)がある。これらの系は、その性質として、系のパラメータをコントロールすることが可能であり、その制御された環境下で量子相転移に関する実験が可能になってきている。

しかし量子臨界点は、系の比較的特殊なパラメータ領域でのみ発現する事が多く、そのため実験的にもこれを検出することが困難になる場合が多い。実際にその特殊なパラメータ領域から外れたところでは、臨界点ではなく競合する相の間のクロスオーバーとなる場合が多いと予想される。ところが多くの臨界点直上の理論では、その特殊なパラメータに由来する臨界点直上だけで成立する特別な対称性に立脚しているため臨界点近傍の振舞をカバーしきれない。したがって、上記に述べた意味での量子臨界点の持つ“脆弱さ”を認めると、臨界点直上だけの理論研究では、臨界点そのものの理論的理解のみならず、それを検出しようと試みる実験に対しても不十分であるという事ができる。

## 2. 研究の目的

そこで量子臨界点を、その周りのクロスオーバー領域を含めて、すなわち量子臨界点を取り囲む局所フェルミ液体領域からアプローチする事によって、内在する普遍性を総合的かつ自然に理解する事が理論的にも実験的見地からも希求される事と考えるに至った。

研究開始当初には、以上に述べた事を、次に挙げる典型的な系の量子臨界点およびクロスオーバー領域で具体的に展開するとした。(1)局所的反強磁性秩序相と Kondo 効果の競合(2)局所的電荷秩序相と Kondo 効果の競合(3)オーバースクリーニング相とフェルミ液体相の競合(4)4重量子ドットの長岡強磁性相と Kondo 効果の競合(5)4重量子ドットの Lieb 強磁性相と Kondo 効果の競合

## 3. 研究の方法

系の低エネルギー状態に興味があるので、その状態を精密に記述する有効モデルを構築してそれを用いて系を論ずる方法をとる。系の低エネルギー状態を記述する有効モデルの表式を次の方針(1)から(3)に従って決定する。(1)有効モデルは元のモデルと同じ対称性を持つ(本研究では量子不純物系を考察しているので自発的対称性の破れは起こらないと考えられる)(2)有効モデルの相互作用項は2体である、(3)相互作用項は量子不純物の演算子で記述できる。

次にやるべき事は、上で決定した有効モデルの表式に含まれるパラメータ(繰り込まれたパラメータ)を具体的に決定することである。これは数値繰り込み群を利用して以下述べるようにして求める事ができる。そこでの原理は Landau の Fermi 液体論の考え方である。ここで重要な点は、この時点では作業仮説である Fermi 液体論の仮定は、本研究で考察する系毎に実行する数値繰り込み群の結果より、以下に述べるように直接数値的に確かめる事ができる事である。

Landau の Fermi 液体論によれば絶対零度での有効ハミルトニアンは自由な準粒子を記述する。そのパラメータ(1体の繰り込まれたパラメータ)を数値繰り込み群の固定点から求める事ができる。具体的には次の通りである。数値繰り込み群で得られたエネルギー固有値から、系の1粒子励起エネルギーを得ることができる。系の1粒子励起エネルギーは Green 関数の極であり、その事を利用して1体の繰り込まれたパラメータを逆算する。またこの1粒子励起エネルギーに準粒子を詰めていくことにより、数値繰り込み群で得られた多体エネルギーを再現するかどうかを確かめることにより、考察する系毎の Fermi 液体性の確認できる。

次に準粒子間の相互作用を特徴付けるパラメータであるが、これは数値繰り込み群で、系が固定点に近づく様子から求める事ができる。具体的には次の通りである。(以下の説明では準粒子間の相互作用は2体のものとする。)数値繰り込み群で得られたエネルギー固有値から、系の2粒子励起エネルギーを得ることができる。自由な準粒子系を記述するモデルは既に決定されているので、自由な準粒子の2粒子励起エネルギーが得られるので、これと先に述べた「準粒子間相互作用込みの2粒子励起エネルギー」との差を計算することができる。このエネルギー差が準粒子間の相互作用によるものであり、それは固定点付近であれば(それは、自由な準粒子の2粒子励起エネルギーに対して非常に僅かであるので)準粒子間相互作用に対する通常の1次摂動論で解釈する事ができる。この解釈のもと準粒子間相互作用のパラメータを逆算する。以上より、有効モデルを特徴付ける繰り込まれたパラメータが具体的に決定される。

次にこの有効モデルを利用して系の物理

量を計算する。具体的には、準粒子で既に考慮された相互作用の効果を2重に考慮することを避けて摂動論(繰り込まれた摂動論)を実行する。その事により、低エネルギーの極限で厳密な表式が得られる。

#### 4. 研究成果

伝導電子系にそれぞれ結合している2つの局在軌道が反強磁性的に相互作用している系では、その反強磁性的相互作用による2つの局在軌道間の局所的な反強磁性秩序相と伝導電子によるKondo効果が競合するが、反強磁性的相互作用がある臨界値より大きいと、局所的な反強磁性秩序の方が実現する。この状況で2つの局在軌道に同方向に磁場を印加すると、ある臨界磁場以上では局所的な反強磁性秩序は崩壊する。我々はこの系を繰り込まれた摂動論と数値繰り込み群で研究した。得られた数値繰り込み群のエネルギー固有値から、臨界磁場の両側で、系の励起エネルギー準位は通常の準粒子励起(Fermi液体)で記述できることを明らかにした。また局在軌道中の電子数を、磁場を変化させて数値繰り込み群から直接的に計算した結果、臨界点において連続であることを明らかにした。一方で我々は模型の繰り込まれたパラメータを数値繰り込み群から計算し、それらを用いてFriedel総和則に基づいて電子数を計算した。総和則による電子数は臨界点において不連続に変化することが明らかになった。数値繰り込み群から直接的に計算した電子数と比較すると、臨界磁場よりも高磁場側では2つの方法による電子数はよく一致するが、総和則による電子数は低磁場側全域において一定の半整数性を持ってずれていることを明らかにした。この一定の半整数性のずれは、ゼロ磁場の系において反強磁性的相互作用を変化させたときに、それがある臨界値にて生じる量子臨界現象においても確認され、この場合は臨界値より高い場合に生じることを明らかにした。これはLuttingerの定理でゼロとなる量(Luttinger積分)が(半)整数性を伴ったトポロジカル指数となり、量子臨界点により隔てられた、2つのFermi液体相を区別特徴付けていると理解解釈できる。また、また我々は、本研究で得られた結果とFractionalized Fermi液体理論等の関連等を議論した。(以上は系(1)に関連派生した研究成果)

ドット間斥力を有する2重量子ドット系が、低エネルギー状態(低エネルギー固定点)でスピンと軌道自由度に由来するSU(4)対称性を発現するかどうかを考察した。

そのために、まず系の低エネルギー状態を記述する有効ハミルトニアンを構築した。この有効ハミルトニアンは繰り込まれたパラメータで特徴付けられ、それらパラメータは数値繰り込み群を援用して具体的に求める

ことができる。また繰り込まれた摂動論を用いると、種々の静的応答関数の厳密な表式が繰り込まれたパラメータを用いて得られる。それらの量を用いて、SU(4)対称性出現を判定するいくつかの段階的基準を定義し、いくつかの興味あるパラメータ領域でそれらをチェックした。得られた結果から、繰り込まれたSU(4)対称性の厳密な出現はKondo温度がゼロの極限で漸近的に達成されることが示唆された。(以上は系(2)に関連派生した研究成果)

4重量子ドット上のLieb磁性とNagaoka強磁性のスピン状態が、これらに接続した2つの電子溜の伝導電子によるKondo効果でどのように遮蔽するのかを研究した。

4重量子ドットのパラメータ空間で、スピントリプレット状態であるLiebフェリ磁性と、スピントレット状態であるNagaoka強磁性の領域と量子状態を詳細に研究した上で、その状態へのKondo効果の影響を研究した。各磁性状態の量子状態を反映して、Kondo効果による遮蔽は2段階で起こる領域と1段階で起こる領域があることを見出し、この系が多様な振る舞いをすることを明らかにした。(以上は系(4,5)に関連した研究成果)

#### 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 4件)

Nishikawa Y, Curtin O J, Hewson A C, Crow D J G  
Magnetic field induced quantum criticality and the Luttinger sum rule  
<https://arxiv.org/abs/1712.08771>

Curtin O J, Nishikawa Y, Hewson A C, Crow D J G  
Fermi Liquids and the Luttinger Integral  
Journal of Physics Communications 2018 031001~031001  
<https://doi.org/10.1088/2399-6528/aab00e>

Y.Nishikawa, O.J.Curtin, A.C.Hewson, D.J.G .Crow, J.Bauer  
Conditions for observing emergent SU(4) symmetry in a double quantum dot  
Phys. Rev. B 93 2016 235115\_1-14  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.235115>

Sakano Rui, Oguri Akira, Nishikawa Yunori, Abe Eisuke  
Current cross-correlation in the Anderson impurity model with exchange interaction  
Physical Review B 97 2018 045127~045140

https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.045127

〔学会発表〕(計 7件)

西川裕規, D.J.G. Crow, A.C.Hewson  
2 重量子ドット系に於けるいくつかの量子臨界点近傍の普遍的振舞とクロスオーバー  
日本物理学会秋季大会  
2015年09月17日~2015年09月17日  
関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市山手町)

西川裕規, O.J. Curtin, A.C. Hewson, D.J.G Crow, J. Bauer  
2 重量子ドット系の低エネルギー状態に於けるSU(4)対称性出現に関する条件  
日本物理学会 第72回年次大会  
2017年03月20日~2017年03月20日  
大阪府豊中市待兼山町 大阪大学豊中キャンパス

島田典明, 西川裕規  
4 重量子ドット上のLiebフェリ磁性と近藤効果  
日本物理学会 第72回年次大会  
2017年03月20日~2017年03月20日  
大阪府豊中市待兼山町 大阪大学豊中キャンパス

西川裕規・オリバー・カートン・アレックス・ヒューソン・ダニエル・クロウ・ヨハネス・バウアー  
ドット間斥力を有する2重量子ドット系の低エネルギー状態でのSU(4)対称性出現に関する考察  
第35回 量子情報技術研究会  
2016年11月14日~2016年11月14日  
茨城県つくば市大穂 KEKつくばキャンパス

阪野壘, 小栗章, 西川裕規, 阿部英介  
局所フェルミ流体のベル相関と完全計数統計  
日本物理学会 2016年秋季大会  
2016年09月13日~2016年09月13日  
石川県金沢市角間町 金沢大学角間キャンパス

西川裕規, O.J. Curtin, A.C. Hewson, D.J.G Crow, J. Bauer  
Consideration of emergent SU(4) symmetry in a double quantum dot  
APPC-AIP 2016  
2016年12月05日~2016年12月05日  
オーストラリア ブリスベン Brisbane Convention and Exhibition Center

阪野壘, 小栗章, 西川裕規, 阿部英介  
Bell pair creation in current of Kondo-correlated dot  
APS March meeting

2017年03月14日~2017年03月14日  
アメリカ合衆国 ルイジアナ ニューオーリンズ Ernest N.Morial Convention Center

〔図書〕(計 1件)  
A.C.Hewson, D.J.G Crow, Y.Nishikawa, World Scientific, Quantum Criticality in Condensed Matter, 2015 22pages Chapter4, ISBN-13: 978-9814704083

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織  
(1)研究代表者  
西川裕規(NISHIKAWA Yunori)  
大阪市立大学・大学院理学研究科・講師  
研究者番号: 60373239

(2)研究分担者 ( )

研究者番号:

(3)連携研究者 ( )

研究者番号:

(4)研究協力者 ( )