

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12611

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17725

研究課題名(和文)量子クラスター展開法にもとづく希薄なフェルミ多体系の系統的研究

研究課題名(英文) Systematic study of dilute Fermi systems based on quantum cluster expansion method

研究代表者

作道 直幸 (Sakumichi, Naoyuki)

お茶の水女子大学・ソフトマター教育研究センター・特任助教

研究者番号：50635555

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：(1) 2次元の3He系は液体相を持つか、という問題に取り組んだ。本研究ではエネルギー汎関数を用いた変分法を用いてエネルギーと粒子数密度の関係を求めることで、スピン三重項状態が準安定な液体相を形成することを発見した。(2) クォークの少数系に関して、QCDの真空のAbelian partやmonopole partが閉じ込めの性質をどの程度保持しているのかを明らかにした。(3) 古典系に関する新たな展開として粘弾性体の研究を行った。クラスター展開そのものではなく、上記(2)の研究で培った格子ゲージ理論の経験に基づいて、粘弾性体の亀裂進展に関する速度ジャンプのメカニズムの解明に成功した。

研究成果の概要(英文)：(1) We have addressed the problem of two-dimensional 3He system having a liquid phase. In this study, we found that the spin triplet state forms a metastable liquid phase by obtaining the relationship between energy and particle number density by using the variational method using energy functional. (2) As to the few-body systems of quarks, it was clarified how much the confinement properties are retained by Abelian part and monopole part of QCD vacuum. (3) We studied viscoelastic body as a new development of classical system. Based on the experience of the lattice gauge theory in the research of (2) above, it succeeded in elucidating the mechanism of velocity jump on the crack growth of viscoelastic body.

研究分野：統計物理学

キーワード：Lee-Yangの量子クラスター展開法 エネルギー汎関数を用いた変分法 monopole dominance Abelian dominance

1. 研究開始当初の背景

レーザー冷却等によって極低温に冷却されたフェルミ原子気体は、フェッシュバハ共鳴を用いて相互作用を自由に変調できる。この性質を用いて、BCS-BEC クロスオーバーと呼ばれる「クーパー対が起こす BCS 超流動状態」から「二原子分子のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)状態」までの連続的な変化が実験的に実現されており、フェルミ系とボース系の量子凝縮現象を統一的に理解するモデルとして注目されている。

申請者は、BCS-BEC クロスオーバーに関する新しい解析手法として、量子クラスター展開法を用いた研究を行ってきた。量子クラスター展開法は、熱力学関数をフガシティで展開する手法である。フガシティが小さい極限は粒子数密度が小さい極限に対応するため、量子クラスター展開法は希薄な量子系に有効である。冷却原子気体は非常に希薄であり、量子クラスター展開法を用いるのに最適な系である。実際、3次までの展開係数を求めると [Liu et al., PRL ('09)], フェルミ温度以上の高温で実験データ [Nascimbene et al, Nature ('10)] を定量的に説明する。量子クラスター展開法は冷却原子気体に有効であるが、展開を有限次数で打ち切ると熱力学関数が多項式となるため、相転移を記述できない。そこで申請者は、超流動相転移の判定条件である「非対角長距離秩序の発現」を用いて、展開を無限次まで取り込むことで、ボース系およびフェルミ系の相転移点を計算する方法を確立した [Sakumichi et al., PRA ('12)]。さらに、この方法を用いて BCS-BEC クロスオーバーの相互作用が弱い極限(BCS 極限)と強い極限(BEC 極限)における相転移温度が正しく導出できることを示した [Sakumichi et al., PRA ('14)]。

2. 研究の目的

上記のように、冷却原子気体の研究は理論的・実験的に大きく進展している。これらの知見は系の希薄性を前提にしており、他の希薄な量子系との共通点が多いと考えられる。本研究では、特に実験的・観測的な進展の著しい2次元 ^3He 系と低密度中性子物質に注目して以下のような研究を行う。

(A) 2次元の ^3He 系は液体相を持つか？

最近、グラファイト表面に ^3He を吸着させた2次元の ^3He 系で、気体から液体への相転移が観測された [Sato et al, PRL ('12)]。しかし、量子モンテカルロ法を用いた多体計算によると、2次元 ^3He 系の基底状態は常に気体であり [e.g., Ruggeri et al, PRL ('13)], 両者は相反する。本研究では、2次元 ^3He 系の基底状態が液体相を持つかと言う未解決問題を解決するために、エネルギー汎関数を用いた変分法を用いて、エネルギーと粒子数密度の関係を求める。これにより、2次元の ^3He 系が液体状態を持つか調べる。

(B) 中性子やクォークなどの少数系の物理を

クラスター展開を通じて研究する。中性子星は、質量が太陽程度、半径約10kmの非常に重い天体である。中性子星は、コアと呼ばれる中心部の高密度領域と、殻(クラスト)と呼ばれる周辺の領域からなる。中性子星の殻では、原子核から中性子が漏れだしており、希薄な中性子の気体(密度が高くなると超流動状態)になっている。

3. 研究の方法

量子クラスター展開法を用いて希薄なフェルミ多体系を系統的に解析し、様々な物理系に共通の普遍的な性質を明らかにする。本研究ではまず、2次元 ^3He の3体系と4体系の束縛状態の計算を行う。少数系であれば、数値的に厳密な基底状態は計算可能である。申請者らは、3体系が1mK未満の非常にエネルギー的に浅い束縛状態を持つと言う予備的な結果を得た [作道 et. al., 物理学会('14秋)]。束縛状態が浅いと、少数の自由度を正確に計算しなければ多体系の物理を再現できない。量子クラスター展開法を用いれば、少数自由度の計算を行った結果、多体系の相転移点を計算できるため、この問題が解決できると考えられる。エネルギー汎関数を用いた変分法を用いて、エネルギーと粒子数密度の関係を求める。これにより、2次元の ^3He 系が液体状態を持つかを明らかにする。

4. 研究成果

成果は、大きく分けて以下の3つである。
(1) 2次元のヘリウム3系は液体相を持つか、という問題に取り組んだ。動きが2次元に制限されたヘリウム3系は、基底状態は気体であると予想されてきた。ところが近年、グラファイト表面上に吸着させた理想的な2次元ヘリウム3系の実験により、この系の基底状態が液体となる可能性が示された。この問題について、本研究ではエネルギー汎関数を用いた変分法を用いてエネルギーと粒子数密度の関係を求めた。本研究では、2次元ヘリウム3系の基底状態が液体相を持つかと言う未解決問題を解決するために、エネルギー汎関数を用いた変分法を用いてエネルギーと粒子数密度の関係を求めた。まず1年目は二次のクラスターの範囲で計算した結果、その近似の範囲内では液体状態が存在するが、結果が実験で得られた液体状態の粒子数密度とは異なっていた。そのため近似の次数を上げて結果を調べる必要がある。この結果の一部は国際誌 Journal of Physics にて報告した。次に2年目には、3次に拡張した。結果、1粒子当たりのエネルギーは有限の面密度で停留値を持ち、その傾向は基板への吸着の効果を考慮した最近の量子モンテカルロ計算に類似した。またスピン三重項状態の原子対が多く形成される傾向が見られた。この結果の一部は共同研究者が日本物理学会にて報告した。最終年度の3年目には、中心力相関のみを考慮した場合のエネルギー汎

関数の改良を行って3次元液体ヘリウム3のエネルギー計算値を改善した上で、改めて2次元ヘリウム3系の性質を調べた。またこのエネルギー汎関数の改良が、これまで報告してきた本変分法に基づく核物質状態方程式に与える影響についても調べた。以上の結果は共同研究者が日本物理学会にて報告した。以上の成果については、今後、原著論文にて発表予定である。

(2) クォークの少数系に関して、量子色力学(QCD)の真空のAbelian partが閉じ込めの性質をどの程度保持しているのかを調べる研究を行った。我々の以前の研究で、クォーク・反クォークからなるメソンの場合にAbelian partが閉じ込め力をほぼ完全に保持していることを発見し、原著論文として報告していた。本年度は、三個のクォークからなるバリオンのポテンシャルを数値解析することで、メソンだけではなくバリオンの場合でもAbelian partが閉じ込め力をほぼ完全に保持していることを発見した。結果は原著論文にまとめ、Physical Review Dに掲載された。また、ギリシャで行われた国際学会ICNFP2015で口頭発表を行った。また、クォークの閉じ込め問題に関して、ゲージ場のAbelianセクターの自由度からホッジ分解によってmonopoleセクターの自由度を抜き出してきたときに、閉じ込めの性質がどの程度保持されるかという、いわゆる「monopole dominance」の研究を行った。結果は、原著論文として国際誌への投稿準備中である。

(3) 本研究の研究課題であるクラスター展開は、元々はUrsellやMayerらが液体論の文脈で行ったものである。本研究では主に量子系のクラスター展開の研究に取り組んできたが、これまでに得られた量子系の知見から古典系についても新たな展開ができないかという検討の一環として、粘弾性体の研究を行った。結果として、クラスター展開そのものではなく、上記(2)の研究で培った格子ゲージ理論の経験に基づいて、粘弾性体の亀裂進展に関する速度ジャンプに関する成果を得た。成果は、英国科学誌Scientific Reportsに掲載された。また、科学雑誌『子供の科学』、新聞紙上報道(日刊工業新聞等)、webメディア(Yahooニュース等)など、数多く取り上げられ、「日本ゴム協会年次大会・若手優秀発表賞」および「エラストマー討論会・若手優秀発表賞」を受賞し、計4件の招待講演を行った。

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6件)

[1] Naoyuki Sakumichi and Ko Okumura, “Exactly solvable model for a velocity jump observed in crack propagation in viscoelastic solids”, Scientific Reports 7, 8065 (2017).

査読有

10.1038/s41598-017-07214-8

[2] Naoyuki Sakumichi and Hideo Suganuma, “Perfect Abelian dominance of confinement in mesons and baryons in SU(3) Lattice QCD”, European Physical Journal Web of Conferences, 126, 04042 (2016).

査読有

10.1051/epjconf/201612604042

[3] Masatoshi Takano, Tatsuya Suzuki, and Naoyuki Sakumichi, “Variational calculations with explicit energy functionals for fermion systems at zero temperature”, Journal of Physics: Conference Series, 702, 012016 (2016).

査読有

10.1088/1742-6596/702/1/012016

[4] Hideo Suganuma and Naoyuki Sakumichi, “Perfect Abelian dominance of confinement in quark-antiquark potential in SU(3) lattice QCD”, AIP Conference Proceedings 1701, 020016 (2016).

査読有

10.1063/1.4938605

[5] Naoyuki Sakumichi and Hideo Suganuma, “Three-quark potential and Abelian dominance of confinement in SU(3) QCD”, Physical Review D 92, 034511 (2015).

査読有

10.1103/PhysRevD.92.034511

[6] Hideo Suganuma and Naoyuki Sakumichi, “The three-quark potential and perfect Abelian dominance in SU(3) lattice QCD”, Proceedings of Science (Lattice 2015), 323 (2015).

査読有

10.22323/1.251.0323

[学会発表] (計 14 件)

[1] Naoyuki Sakumichi and Ko Okumura
「Exactly solvable model for a velocity jump observed in crack propagation in viscoelastic solids」、

『DYFP2018 (18th International Conference on Deformation, Yield and Fracture of Polymers)』、
Netherlands, Kerkrade, Roldec Addey、2018年3月27日

[2] 鷹野正利、作道直幸
「ヘリウム3原子系に対するエネルギー汎関数変分法の改良と核物質状態方程式への応用」

『日本物理学会 第73回年次大会』、
東京理科大学 (野田キャンパス)、2018年3月

[3] 作道直幸、奥村剛
「ゴムの亀裂進展速度の二段階ジャンプ：可解モデルによる理解」、
『第28回エラストマー討論会』、
京都大学宇治キャンパス、2017年11月29日、
[若手優秀発表賞 受賞]

[4] Naoyuki Sakumichi and Ko Okumura
「Exactly solvable model for a velocity jump observed in crack propagation in viscoelastic solids」、

『Japan-Taiwan Bilateral Symposium - Polymeric Materials for Future Vehicles』、
台湾、国立成功大学、2017年11月21日

[5] Naoyuki Sakumichi、
「Guiding principles to develop tough polymer materials: An exactly solvable model」、
iTHEMS seminar、
埼玉、理化学研究所、2017年5月25日

[6] 作道直幸、奥村剛
「厳密に解けるモデルから導かれるゴム材料のタフ化への指針」、

『日本ゴム協会 2017年年次大会』、
名古屋市中小企業振興会館、2017年5月18日、
[若手優秀発表賞 受賞]

[7] Naoyuki Sakumichi and Ko Okumura、
「Exactly solvable model for crack propagation in viscoelastic sheets: How to control a velocity jump leading to catastrophic failure」、

『American Physical Society March Meeting 2017』、R16.00007、
United States, New Orleans、2017年3月

[8] 鈴木達也、鷹野正利、作道直幸
「エネルギー汎関数を用いた変分法による二次元ヘリウム3系の研究」

『日本物理学会 第72回年次大会』
大阪大学豊中キャンパス、2017年3月

[9] 作道直幸、奥村剛
「厳密に解けるモデルから導かれるポリマー材料のタフ化への指針」、
『平成28年度 第14回未踏科学サマー道場』、
千葉県柏市、東京大学フューチャーセンター、
2016年8月、P-12、[ポスター発表 注目賞 受賞]

[10] Naoyuki Sakumichi and Ko Okumura
「An exactly solvable model for discontinuous transitions in the velocity of crack propagation in viscoelastic solids」、

『International Conference on Statistical Physics (STATPHYS26)』、
Lyon, France、2016年7月

[11] Naoyuki Sakumichi、
「High-velocity drag friction near the jamming point in two-dimensional granular materials」、

『Avalanches, plasticity, and nonlinear response in nonequilibrium solids』、
京都大学基礎物理学研究所、2016年3月

[12] 作道直幸
「数式処理システムを用いた非平衡相転移現象の解析」、

『第8回基礎物理セミナー合宿』、P-19、
静岡県箱根太陽山荘、2016年2月

[13] Naoyuki Sakumichi and Hideo Suganuma、
「Perfect Abelian dominance of confinement in mesons and baryons in SU(3) lattice QCD」、

『4th International Conference on New Frontiers in Physics』、
Greece, Crete、2015年8月

[14] Hideo Suganuma and Naoyuki Sakumichi、
「The Three-Quark Potential and Perfect Abelian Dominance in SU(3) lattice QCD」、
『33rd International Symposium on "Lattice Field Theory" (Lattice 2015)』、
Kobe, Japan、2015年7月14-18日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

[1] 作道直幸, 『ゴムの破壊の物理学:「速度ジャンプ」はなぜ起きるのか?』, 学術系 Web メディア「Academist Journal」研究コラム (2017年10月12日).
<https://academist-cf.com/journal/?p=6108>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

作道直幸 (Naoyuki Sakumichi)

お茶の水女子大学・ソフトマター教育研究センター・特任助教

研究者番号: 50635555