

計画研究 C02 「物質の階層変化および状態変化に伴う普遍的物理」 2019 年度の活動報告

代表：堀越宗一（大阪市立大学）

分担：大橋洋士（慶應義塾大学）

分担：飯田圭、田島裕之（高知大学）

C02 班では冷却原子を用いた量子シミュレーション実験と理論研究の両輪により、「量子クラスター形成としてのフェルミ粒子対形成や、自由度の中和過程としてのフェルミ対のボソン化、および、そうした現象に起因する量子多体効果の全容を解明すること」を目指している。2019 年度は主に、実験研究では「フェッシュバツハ分子の吸収分光実験」、理論研究では「フェルミ原子気体ずり粘性率と Kovtun-Son-Starinets (KSS) 予想」と「不純物原子が媒質中の励起を伴って形成するポーラロンの物性」を進展させた。

1. フェッシュバツハ分子の吸収分光実験（代表：堀越）

粒子階層を横断する普遍的な量子クラスターとして、大きな散乱長で束縛している分子状態が挙げられる。大きな散乱長が生じるメカニズムは各粒子階層で異なるが、散乱長に起因する物理現象は大きな散乱長の発生メカニズムに依らず普遍的な振る舞いを示す。例えば状態方程式は散乱長、熱的ドブロイ波長、平均粒子間距離（粒子数密度）の3つの長さスケールの大小関係で決まり、相互作用の詳細は重要ではない。冷却原子系では「フェッシュバツハ共鳴」によって散乱長の値を外部磁場によって制御可能である。故に冷却原子系は大きな散乱長を持つ量子系の量子シミュレータとして活用できる。

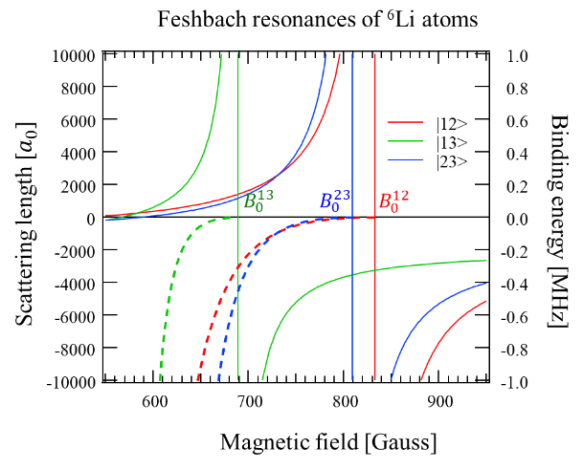
以下では大きな正の散乱長で束縛する2体の束縛状態（フェッシュバツハ分子）に注目する。この量子状態に相当するのが、冷却原子系ではフェッシュバツハ分子、核子系では重陽子、ハドロン系では Λ (1405) 等である。このような量子状態は2粒子がギリギリ束縛する閾値近傍に存在するため、異なる粒子階層をつなぐ重要な物理を含んでいる。一般的に束縛状態は、相互作用ポテンシャルの形状で決まる固有状態であるため自由に変えられない。しかし大きな正の散乱長で束縛する2体の束縛状態は、とびとびの量子状態を持たず散乱長の関数で連続的に変化し、その束縛状態の直径は散乱長と等価となる。故に冷却原子系では「フェッシュバツハ共鳴」によって「束縛状態のサイズ」が制御できる。

我々の実験では6Li原子というフェルミ粒子を用いているため、2つのフェルミ粒子が遠く離れて束縛している状態から、接近して束縛する状態まで連続的に制御することができる。このとき主に3つの興味深い物理がある。1つ目は、「自由に運動している原子が束縛されるにつれてどの物理量がどのように変化するか？」2つ目は、「束縛状態のサイズに依存して束縛状態間の相互作用はどのように変化していくのか？」3つ目は、「粒子度、または複合粒子度を指標づける物理量は存在するか？」である。これらは本新学術領域研究で全ての班に共通する研究課題である。さらに2018年度の分担者(大橋)の理論研究により、フェッシュバツハ分子間の相互作用はパウリの排他率が支配的で斥力相互作用であるが、3つのフェッシュバツハ分子が同時に相互作用した際には、対交換の影響により引力相互作用が追加で加わる「新しい3体力の存在」

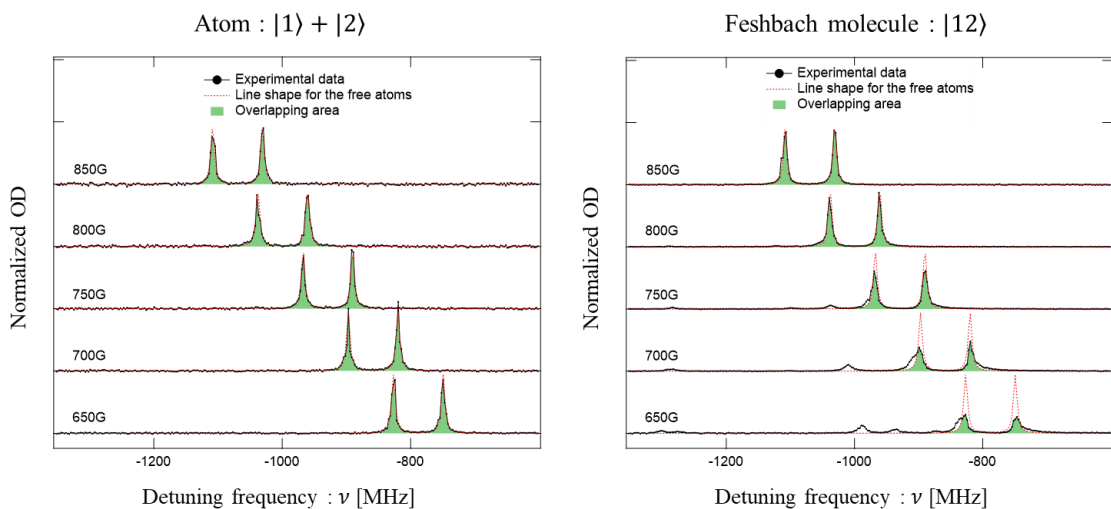
が示唆され、この効果は圧縮率を測定することによって検証可能であることも明らかにされた。

圧縮率を測定するためには、トラップポテンシャル中の粒子数密度分布を測定する必要がある。冷却原子の測定は吸収撮像法で行うが、この手法は対象物の光学応答を理解しておく必要がある。しかしこれまでフェッシュバツハ分子の光学応答について詳細に研究した例がない。また、光学応答は原子核実験で用いられている双極子励起に相当するため、冷却原子と原子核実験で普遍性と多様性を整理できる可能性も含んでいる。以上の背景の下、2019年度は「フェッシュバツハ分子の吸収分光実験」に重点を置いた。

右図に ${}^6\text{Li}$ 原子のフェッシュバツハ共鳴の振る舞いを示した。ここでは $|1\rangle|2\rangle|3\rangle$ の異なる内部状態（電子スピンと核スピンの内部自由度）の組み合わせを考えており、3つの組み合わせは異なるフェッシュバツハ共鳴を持つ。実線が磁場に対する散乱長の変化を示しており、点線が束縛エネルギーを示している。このように3つのフェッシュバツハ共鳴は異なる共鳴磁場と共鳴幅を持つので、様々な条件でフェッシュバツハ分子の光学応答を調べることができる。

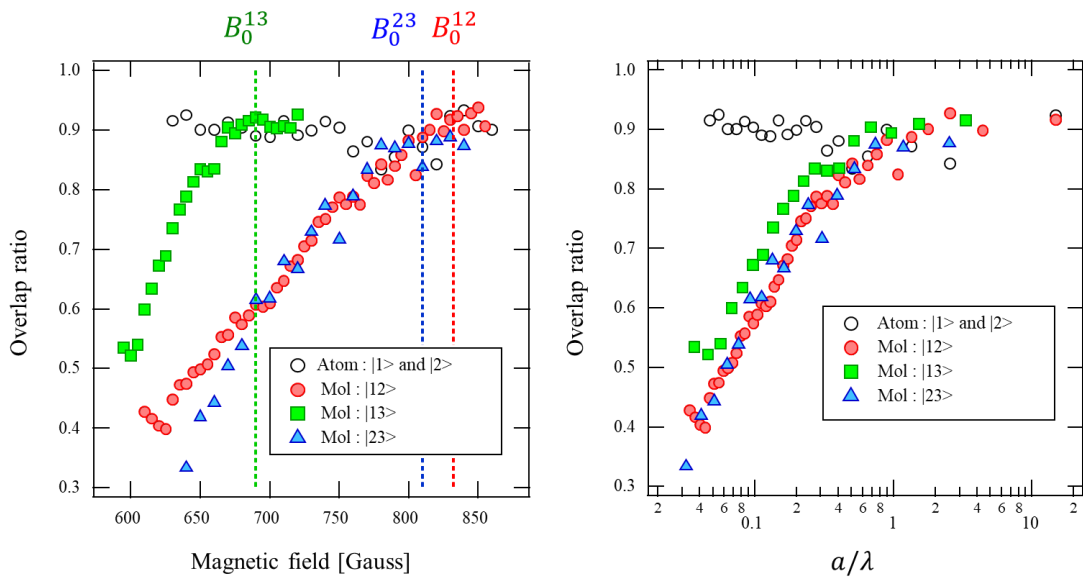


下図が $|1\rangle$ と $|2\rangle$ の内部状態の組み合わせで観測した吸収スペクトルの変化の様子である。左下図が束縛しないように各磁場に2つの内部状態を用意したときの吸収スペクトルであり、どの磁場でも励起状態の寿命で決まる2つのローレンツ曲線が観測される。共鳴位置が磁場によってシフトするのはゼーマンシフトによるものである。一方、右下図が各磁場の散乱長の値で決まる束縛状態に用意し得られた吸収スペクトルである。先ほどの図に示したように、 $|12\rangle$ の組み合わせは832Gaussで散乱長が発散し、それ以下の磁場で散乱長は正の値を持ち、小さい磁場ほど小さい束縛状態となる。右下図は束縛状態のサイズが小さくなるにつれてスペクトルが孤立原子のもの（赤点線）から変化している様子を示している。



次に、孤立原子のスペクトルからの変化を評価するために、孤立原子のスペクトルとフェッシュバツハ分子のスペクトルの重なり度を評価した。重なり度は、スペクトル変化が小さいと1に近い値を持ち、変化が大きいとゼロの値に近づく。評価した結果を下図に示す。左下図は磁場に対して3つのフェッシュバツハ分子の吸収スペクトルの重なり度の値を示している。どのフェッシュバツハ分子の系列も、共鳴磁場から小さい磁場に進むほどスペクトル形状が大きく変化していく様子を示している。このグラフの横軸を磁場の値から、散乱長を吸収分光に用いているレーザー波長($\lambda=671\text{nm}$)で割った無次元量で示したのが右下図である。このグラフより、異なるフェッシュバツハ分子が共通の物理法則に従っている可能性を強く示唆している。

現在この「重なり度」の物理的意味を議論しており、「粒子度、または複合粒子度を指標づける物理量」として考えることができるか、また核子系やハドロン系などにも同じスペクトル変化が現れるか等を議論している。



以上我々はリチウム6原子の異なる3つのフェッシュバツハ共鳴を用いることで、2原子が非束縛状態からフェッシュバツハ分子状態に変化する過程でどのように光学応答が変化するか系統的に実験を行った。本実験により、フェッシュバツハ分子のサイズに依存し、光学応答が孤立原子の理想的な吸収スペクトルから分子的な吸収スペクトルに徐々に変化していく様子を世界で初めて捉えた。この実験結果は物質階層を横断して存在する、大きな散乱長で弱く束縛している特異な分子状態やそれらから構成される量子多体系の理解に向けた大きな一歩となる。

2. フェルミ原子気体ずり粘性率と Kovtun-Son-Starinets (KSS) 予想 (分担: 大橋)

冷却フェルミ原子気体の BCS-BEC クロスオーバー領域におけるずり粘性率 η を理論的に研究し、この領域で重要となる、対形成揺らぎの効果を自己無撞着 T 行列理論の枠組みで考慮することで、この輸送係数とエントロピー密度 s の比 η/s に下限値が存在するとする KSS 予想を検証した。従来の予想とは異なり、下限値はユニタリ極限ではなく、それより少し強結合 BEC 側で実現することを明らかにした。また、この下限値の実現には、(1)フェルミ面の存在によるパ

ウリブロッキングと、(2)強結合効果としての分子ボソン形成という2つの量子効果が、本質的に重要な役割を果たしていることを突き止めた(図1参照)。KSS予想は、液体4Heや冷却フェルミ原子気体といった原子階層から、高エネルギー物理学におけるクォーク・グルーオン・プラズマに至るまで、様々な物質階層で議論されている問題であり、この成果は、高い操作性を有する冷却フェルミ原子気体が、この普遍的現象の解明に有効であることを示すものとして重要である。

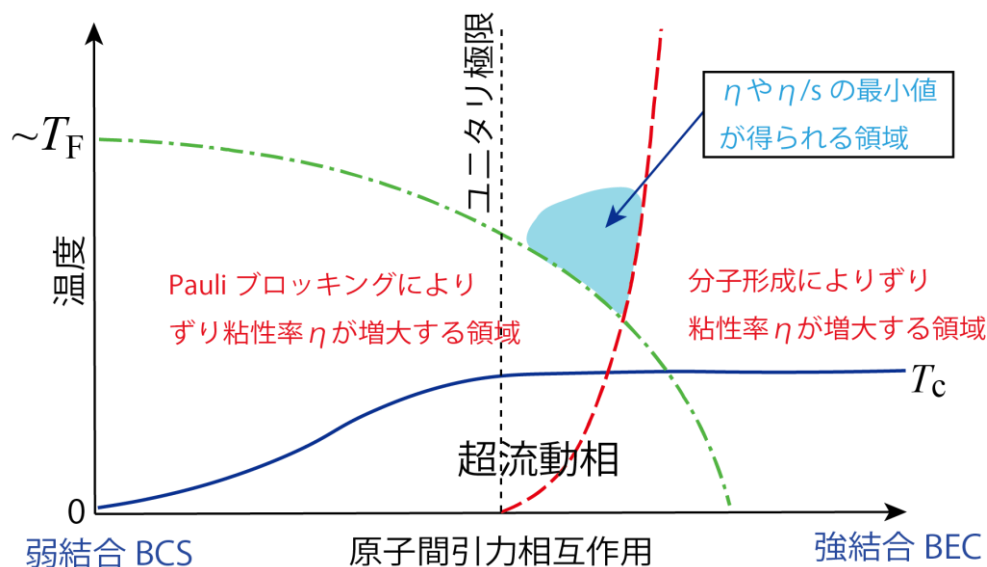


図1：フェルミ原子気体の温度-相互作用相図中で、ずり粘性率 η や η/s の最小値が実現する領域の模式図。弱結合 BCS 側では一点鎖線以下の領域でフェルミが形成され、強結合 BEC 側では鎖線より右側で 2 体束縛状態としての分子ボソンが形成される。これらはいずれも散乱効果を抑制し η を増大させるため、古典領域では降温とともに減少する η は、これらの領域に入ると再び増大する。結果、 η は図に示す領域で最小値をとる。これを反映し、 η/s の最小値もこの領域で実現する。

参考文献

- [1] D. Kagamihara, D. Inotani, and Y. Ohashi, “Shear Viscosity and Strong-Coupling Corrections in the BCS-BEC Crossover Regime of an Ultracold Fermi Gas,” J. Phys. Soc. Jpn. 88 (2019), 114001. DOI: 10.7566/JPSJ.88.114001
- [2] D. Kagamihara, and Y. Ohashi, “Kovtun-Son-Starinets Conjecture and Effects of Mass Imbalance in the Normal State of an Ultracold Fermi Gas in the BCS-BEC Crossover Region,” J. Phys. Soc. Jpn. 89 (2020), 044005. DOI: 10.7566/JPSJ.89.044005
- [3] D. Kagamihara, D. Inotani, and Y. Ohashi, “Shear viscosity and Kovtun-Son-Starinets (KSS) conjecture in an ultracold Fermi gas,” The Fourth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases, 2019/9/30. Kyoto University.

3. 不純物原子が媒質中の励起を伴って形成するポーラロンの物性 (分担：飯田、田島)

重い星の重力崩壊の結果生じる超新星コアや、それが冷えてできる中性子星の内部においては、多彩な物性を示す高密度フェルミ物質が存在する。特に対相関は重要であり、クーパー対の凝縮をもたらす超流動、粒子ホール対の凝縮をもたらす密度波状態はその典型例である。これらの相関を解明するにあたり、冷却フェルミ原子気体が類似した性質をもつことに着目することは有益である。

今年度は、これらの物質を不純物を通じて探るべく、中性子物質中の α 粒子の性質 (投稿準備中)、天体プラズマ中のホイル状態の性質 [1]、双極子相互作用する冷却フェルミ原子気体中のポーラロンの性質 [2]、冷却フェルミ原子気体中のポーロン多体系の衝突 [3] を理論的に調べた。特に、ホイル状態の研究においては、サイズの大きなホイル状態へのクーロン遮蔽効果 (図 1) を第一原理的に調べたはじめての研究である一方、最後に挙げた研究 (図 2) では、衝撃波の発生から音速を通じてポーロン間の相互作用についての情報が得られる可能性を流体力学を用いて示した。

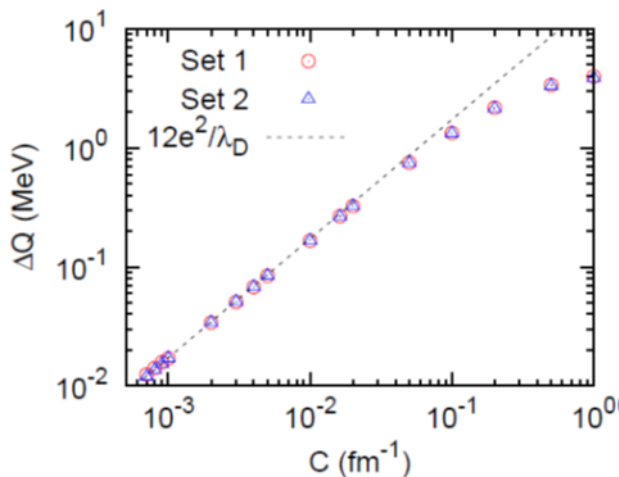


図1 3α 過程 Q 値のデバイ遮蔽による変化 (データ: 3 体量子計算値、横軸: 遮蔽長の逆数、点線: 核の大きさなし) [1]。

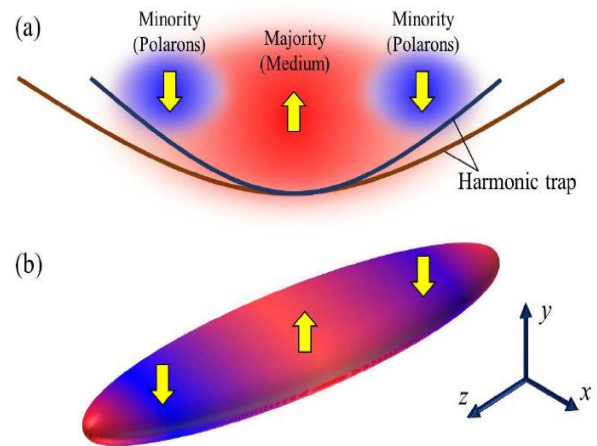


図2 トラップ中においてポーロンの雲同士を衝突させるセットアップ [3]。

他方、中性子星クラスト中の原子核のパスタ構造に着目し、それらの弾性振動により、強磁場をもつ中性子星の巨大フレアにおいて観測されている多数の準周期振動を系統的に理解できることを示した [4]。また、現実の 3 カラーを単純化した 2 カラーのクォーク物質の超流動相において、グルーオンのトポロジカルな性質が十分低温で密度によらないこと (図 3) を、2 カラーの格子 QCD 計算を通じて第一原理的に示した [5]。

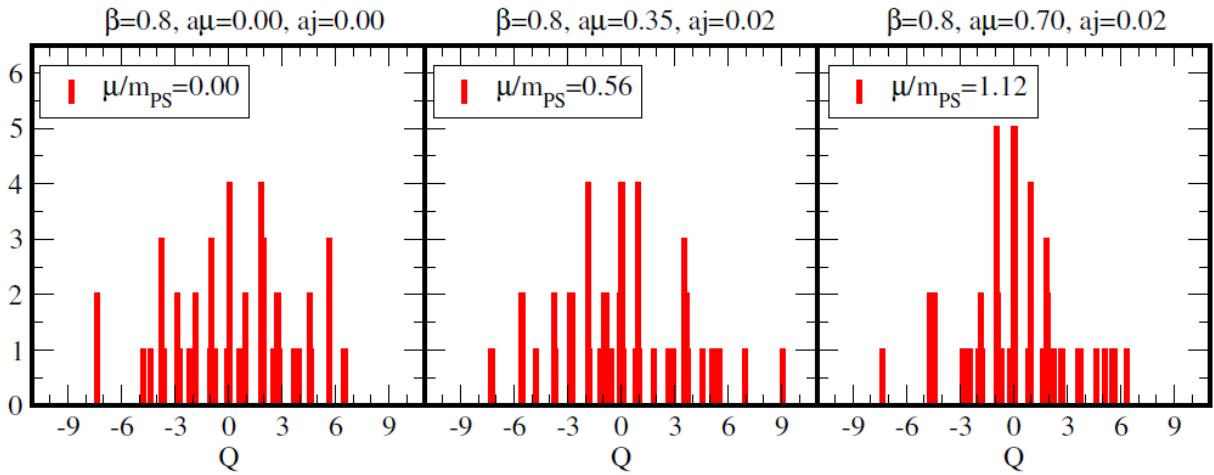


図3 低温領域においていろいろな密度で測定されたトポロジカル電荷の分布[5]。

さらに、2バンド超流動/超伝導におけるBCS-BECクロスオーバーにおける多体効果を調べた[6]。本研究で考慮した異なるフェルミエネルギーを有する2バンドからなるモデル(図4)は、近年報告されたBCS-BECクロスオーバーにある鉄系超伝導体の超伝導揺らぎの効果を調べるのに有用であるとともに、orbital Feshbach 共鳴近傍のYbフェルミ原子気体でも実験的に実現可能と期待される。多体T行列理論を2バンド系に拡張することで超流動/超伝導相転移温度(図5)や熱力学量を解析した結果、サイズが異なる非凝縮Cooper対の共存など通常の1バンド系に見られないような多体効果が現れることがわかった。粒子数差が大きい状況下での多体問題という観点では、ポーラロン問題との共通点も多く、核物質系への応用も今後期待できる成果である。

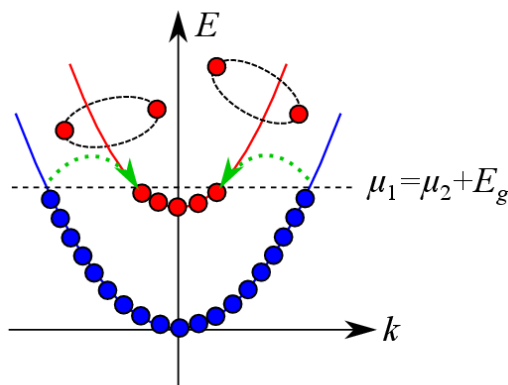


図4 フェルミエネルギーの大小が異なる2バンドが結合した系[6]。

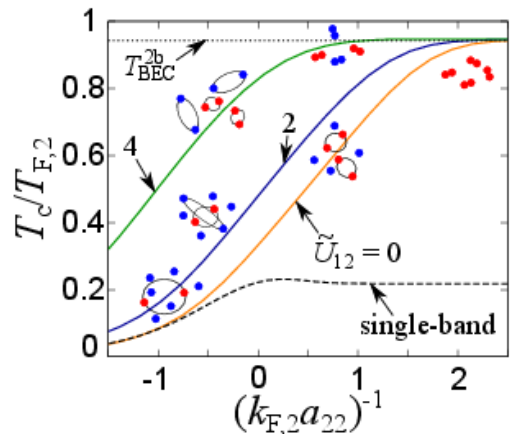


図5 2バンド系のBCS-BECクロスオーバーにおける超流動/超伝導相転移温度[6]。

上述のポーラロン衝突における非平衡ダイナミクスに加え、スピンの反転したフェルミポーラロンを量子ポイントコンタクトで接続した場合のメゾスコピック輸送現象(図6)の研究も

行った[7]。従来のポーラロン研究では基底状態の性質に重点を置かれていたが、これに対し今回解析を行ったスピнкаレントはポーラロンの励起状態が深く関わっていることを明らかにした。また、ポーラロンの数を増やしていきバランス系に近くなると非凝縮 Cooper 対が形成し始め、スピнкаレントは擬ギャップ効果により抑制されることを示した。加えて、このようなバランス系の衝突実験における spin dipole モードの振動数 (図 7) は擬ギャップ効果によって上昇することを理論的に示した[8]。Spin dipole モードは原子核の巨大双極子共鳴と類似した振動であり、有限温度における原子核の対相関の研究にも役立つことが期待される。

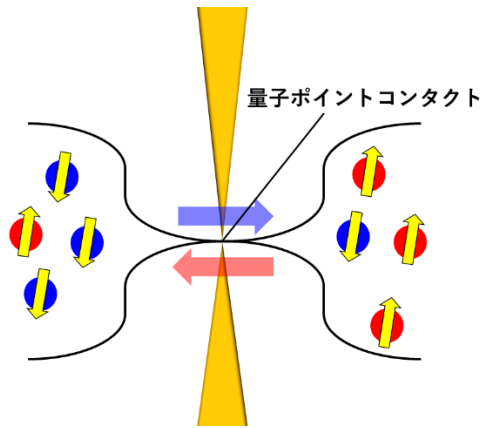


図 6 スピン反転したフェルミポーロン間のメゾスコピックスピン輸送に関する量子ポイントコンタクトのセットアップ[7]。

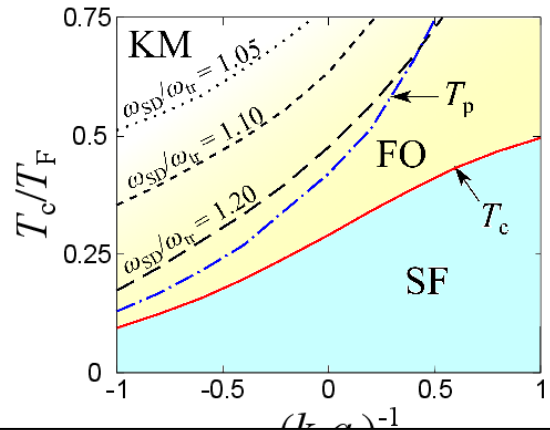


図 7 BCS-BEC クロスオーバー領域における調和トラップ中のフェルミ原子気体において、spin dipole 振動数から決定した相図[8]。

- [1] Lai Hnin Phyu, H. Moriya, W. Horiuchi, K. Iida, K. Noda, and M. T. Yamashita, “Coulomb screening correction to the Q value of the triple alpha process in thermal plasmas,” arXiv:2003.08060.
- [2] K. Nishimura, E. Nakano, K. Iida, H. Tajima, T. Miyakawa, and H. Yabu, “The ground state of a polaron in ultra cold dipolar Fermi gases,” International symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems (CLUSHIQ2020), Beppu, Japan.
- [3] Hiroyuki Tajima, Junichi Takahashi, Eiji Nakano, Kei Iida, “Collisional Dynamics of Polaronic Clouds Immersed in a Fermi Sea,” arXiv:1912.12832.
- [4] Hajime Sotani, Kei Iida, and Kazuhiro Oyamatsu, “Astrophysical Implications of Double-Layer Torsional Oscillations in a Neutron Star Crust as a Lasagna Sandwich,” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 489, 3022-3030 (2019).
- [5] Kei Iida, Etsuko Itou, and Tong-Gyu Lee, “Two-colour QCD phases and the topology at low temperature and high density,” Journal of High Energy Physics 01, 181 (2020).
- [6] Hiroyuki Tajima, Andrea Perali, and Pierbiagio Pieri, “BCS-BEC Crossover and Pairing Fluctuations in a Two Band Superfluid/Superconductor: A T Matrix Approach,” Condensed Matter 5, 10 (2020).

- [7] Yuta Sekino, Hiroyuki Tajima, and Shun Uchino, “Mesoscopic spin transport between strongly interacting Fermi gases,” arXiv:2002.12003.
- [8] Hiroyuki Tajima, Alessio Recati, and Yoji Ohashi, “Spin-dipole mode in a trapped Fermi gas near unitarity,” *Physical Review A* 101, 013610 (2020).