

"Toward the Next Round!-The 60th Natsugaku-"

第60回 物性若手夏の学校 ポスターセッション 概要集

岐阜県 ぎふ長良川温泉ホテルパーク

7月29日(水) 13:00-15:00

7月30日(木) 13:00-15:00

PS番号が奇数の方は7月29日の13:00-14:00

PS番号が偶数の方は7月30日の13:00-14:00

には自分のポスターの前にいてください。

- | | |
|-------|--|
| PS-01 | 光格子系における回折限界を超えた位置測定方法 蘆田 祐人 東京大学大学院 理学系研究科 |
| PS-02 | 汎関数くりこみ群の形式化と応用 中島 拓夫 東京工業大学大学院 理工学研究科 |
| PS-03 | ラビ結合した2成分ボース・アインシュタイン凝縮体における対向超流動のエネルギー的な安定性 白井 彩香 大阪市立大学大学院 理学研究科 |
| PS-04 | 二成分Fermi-Fermi 混合気体の集団励起 -collisionless 領域から流体力学領域まで- 成嶋 優人 東京理科大学 理学研究科 |
| PS-05 | マルチフェロイック物質 h -(Lu _{0.5} Sc _{0.5})FeO ₃ の単結晶育成とその強制的秩序ドメインの観測 鷺見 浩樹 東京大学 新領域創成科学研究科 |
| PS-06 | 温度勾配によって誘起されたスピン波スピントルクの線形応答理論 山口 皓史 名古屋大学大学院 理学研究科 |
| PS-07 | 超強磁場下での二次元直交ダイマー物質SrCu ₂ (BO ₃) ₂ の比熱測定 秋元 昂 東京大学 物性研究所 |
| PS-08 | CrNb ₃ S ₆ 中におけるジャロシンスキー-守谷相互作用とカイラル磁性 徳宿 邦夫 東京大学大学院 理学研究科 |
| PS-09 | ハニカム格子上のJ ₁ -J ₂ 量子ハイゼンベルグモデルに対するボンドランダムネスの効果 上松 和樹 大阪大学大学院 理学研究科 |
| PS-10 | 光誘起相転移：非平衡下での新たな物性探索 高三 和晃 京都大学大学院 物理学・宇宙物理学専 |
| PS-11 | K ₂ NiF ₄ 型構造を持つSr ₂ VO ₄ の磁性と構造 加藤 優介 名古屋大学大学院 理学研究科 |
| PS-12 | レーザー角度分解光電子分光によるFeSeの軌道秩序状態における超伝導ギャップ異方性の観測 橋本 嵩広 東京大学 物性研究所 |

| | |
|-------|--|
| PS-13 | Pr系銅酸化物 $\text{Pr}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15-\delta}$ の超伝導性質に対する還元効果 芳志戸 諭 新潟大学大学院 自然科学研究科 |
| PS-14 | 層状マンガン酸化物における表面によって励起された2つのフリーデル振動の干渉現象 山村 諒祐 首都大学東京大学院 物理学専攻 |
| PS-15 | 多バンド超伝導におけるバンド間結合への強相関効果 橋本 和樹 京都大学大学院 理学研究科 |
| PS-16 | 3次元運動量分解光電子分光を用いた重い準粒子状態観測手法の開発 中谷 泰博 大阪大学大学院 基礎工学研究科 |
| PS-17 | グラフェンの超伝導電流 寒川 崇生 東京大学大学院 理学系研究科 |
| PS-18 | CeCoIn ₅ 系トリコロール超格子による空間反転対称性の破れの導入 成塚 政裕 京都大学大学院 理学研究科 |
| PS-19 | 強相関系におけるトポロジカル超伝導 大同 暁人 京都大学大学院 理学研究科 |
| PS-20 | グラフェン水素化原子欠損における近藤効果の観測法について 森下 直樹 大阪大学大学院 基礎工学研究科 |
| PS-21 | Sb置換によるNdO _{0.7} F _{0.3} BiS ₂ 超伝導体の化学圧力効果 大槻 恵史 東京理科大学大学院 理学研究科 |
| PS-22 | 重い電子系CeRhIn ₅ /YbRhIn ₅ 人工超格子を用いた量子臨界性の精密制御 石井 智大 京都大学大学院 理学研究科 |
| PS-23 | 乱雑位相近似による異方的超伝導の磁気励起の研究 森脇 将貴 島根大学大学院 総合理工学研究科 |
| PS-24 | ガラス転移を示唆する正方晶希土類化合物R ₂ MgSi ₂ (R=Gd,Tb) 沼倉 凌介 埼玉大学大学院 理工学研究科 |
| PS-25 | 局所的な空間反転対称性が破れた系における超伝導 角田 峻太郎 京都大学大学院 理学研究科 |
| PS-26 | 磁場中超伝導状態への多バンド性・Pauli常磁性の効果 足立 景亮 京都大学大学院 理学研究科 |
| PS-27 | 量子スピニアイスYb ₂ Ti ₂ O ₇ における磁気単極子の熱伝導 寺澤 大樹 京都大学大学院 理学研究科 |
| PS-28 | イオンゲート法によるLi _x ZrNCl単結晶の電気伝導と超伝導 中川 裕治 東京大学大学院 工学系研究科 |
| PS-29 | 低密度アルカリ金属液体におけるプラズモン励起観測 萩谷 透 京都大学大学院 理学研究科 |
| PS-30 | 超低温下におけるドハース・ファンアルフェン効果の測定 山田 章悟 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 |
| PS-31 | 熱伝導率測定を用いたフラストレート磁性体の研究 今井 悠介 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 |
| PS-32 | 超流動 ⁴ He中でのcoflowにおける量子乱流 井川 真一 大阪市立大学 理学研究科 |
| PS-33 | 光子偏光-電子スピン間量子もつれ相関の生成に向けた光子-電子の同時検出実験 黒山和幸 東京大学大学院 工学系研究科 |
| PS-34 | トポロジカル量子臨界点近傍におけるアクシオン電磁気学の理論 今枝 立至 名古屋大学大学院 工学研究科 |
| PS-35 | メゾスコピック系におけるスピングラスの雑音測定 谷口 祐紀 大阪大学大学院 理学研究科 |
| PS-36 | 磁場中のカーボンナノチューブ量子ドットにおける近藤効果 寺谷 義道 大阪市立大学大学院 理学研究科 |

| | |
|-------|---|
| PS-37 | ワイル半金属におけるカイラル磁気効果 井辺 洋平 京都大学大学院 理学研究科 |
| PS-38 | MoSe ₂ 発光トランジスタにおける巨大円偏光分極 恩河 大 東京大学大学院 工学系研究科 |
| PS-39 | Agプラズモン励起によるフェルミ海の波立ちを光で見る 高木 健太郎 東京理科大学大学院 理学研究科 |
| PS-40 | 多重軌道ハニカム格子におけるトポロジカル相 服部 綾実 名古屋大学大学院 工学研究科 |
| PS-41 | 非集光レーザーによるポルフィリン分子の異常な会合変化 白川 正之 東京理科大学大学院 理学研究科 |
| PS-42 | 強束縛近似に対するバンドアンフォールディング 西 紘史 東京大学大学院 工学系研究科 |
| PS-43 | 高強度広帯域テラヘルツ光を用いた強相関電子系の非線形分光 岡広 駿 京都大学大学院 理学研究科 |
| PS-44 | 擬一次元量子スピン系CuGeO ₃ のTHz光誘起相転移 岡本 茜 京都大学大学院 物理学・宇宙物理学専攻 |
| PS-45 | 二重4f光学系による超短光パルスの時空間波形整形 篠田 尚輝 東北大学大学院 理学研究科 |
| PS-46 | κ -(BETS) ₂ Fe _{1-x} Ga _x Br ₄ の輸送特性と熱的性質 佐藤 俊 東邦大学大学院 理学研究科 |
| PS-47 | κ -(BETS) ₂ FeBr ₄ および κ -(BETS) ₂ FeCl ₄ の磁場下での熱的性質 宇都宮 一広 東邦大学大学院 理学研究科 |
| PS-48 | 断熱近似を超えた格子の量子揺らぎ 渡邊 侑子 山形大学大学院 理工学研究科 |
| PS-49 | ベイズ統計とカーネル法によるスケーリング解析 島垣 凱 東京大学大学院 理学系研究科 |
| PS-50 | ベイズ統計における相転移理論の構築 徳田 悟 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 |
| PS-51 | 非局所結合位相振動子系におけるpersistent chimera state 須田 裕介 北海道大学大学院 理学院 |
| PS-52 | 情報熱力学による生命科学へのアプローチ 山本 峻平 東京大学大学院 総合文化研究科 |
| PS-53 | ランダムポテンシャル中を流れる超流動Bose系における臨界速度 芳賀 大樹 京都大学大学院 理学研究科 |
| PS-54 | くりこみ群による横磁場Ising 模型の臨界指数の推定 金子 和哉 東京大学大学院 総合文化研究科 |
| PS-55 | 確率過程と一般化量子マスター方程式による揺らぎの定理の導出 深代 隆央 東京工業大学大学院 理工学研究科 |
| PS-56 | 1次元ハミルトニアン系におけるKPZ普遍性 園田 柊平 東京工業大学 理工学研究科 |
| PS-57 | Classical Dynamical Localization 三宅 隼斗 京都大学大学院 理学研究科 |
| PS-58 | 異常輸送と巨視的ゆらぎの理論について 玉木 脩二 慶應義塾大学大学院 理工学研究科 |
| PS-59 | Bi-Te系化合物における熱電性能に関する理論研究 森 俊了 青山学院大学大学院 理工学研究科 |
| PS-60 | 磁気スキルミオン結晶における量子化トポロジカルホール効果 濱本 敬大 東京大学大学院 工学系研究科 |

| | | |
|-------|--|------------------------------------|
| PS-61 | KitaevモデルにおけるMajoranaフェルミオン ミシエンコ ピョートル | 東京大学大学院 工学系研究科 |
| PS-62 | 有機ディラック電子系 α -(BEDT-TTF) ₂ I ₃ 吉村 健太 | 東京大学大学院 工学系研究科 |
| PS-63 | 開放量子系において現れる量子相の研究 白井 佑治 | 東京大学大学院 物理学専攻 |
| PS-64 | 自律デーモンに潜む階層性 -一人のできるもん- 松本 拓巳 | 東京大学大学院 総合文化研究科 |
| PS-65 | 微小な量子熱統計力学的機械のプロトタイプ 畠山 遼子 | 東京大学大学院 理学系研究科 |
| PS-66 | 対向する自己駆動粒子系におけるレーン形成過程の解明 池田 光佑 | 新潟大学大学院 自然科学研究科 |
| PS-67 | 電子対を用いた電子状態の計算手法 川崎 愛理 | 東京大学大学院 理学系研究科 |
| PS-68 | Kitaevモデルの状態空間 越田 真史 | 東京大学大学院 総合文化研究科 |
| PS-69 | 流動誘起不安定化現象における固体境界壁の影響 黒谷 雄司 | 東京大学大学院 工学系研究科 |
| PS-70 | 誘電分光法によるPoly(ethylene glycol)水溶液の不凍水の2度の融解 宮良 政彦 | 東海大学大学院 総合理工学研究科 |
| PS-71 | 化学刺激による分子集合体の自己駆動現象 諸橋 博昭 | 東北大学大学院 理学研究科 |
| PS-72 | 1次元における拡散について 梶谷 壮輝 | 名古屋大学大学院 理学研究科 |
| PS-73 | 鋸歯状電場によるマイクロ粒子の集団運動 早川 雅之 | 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 |
| PS-74 | 非協力ゲームにおける階層の発生 藤本 悠雅 | 東京大学大学院 総合文化研究科 |
| PS-75 | 光格子中の超流動ボース気体におけるNambu-GoldstoneモードとHiggsモードの減衰 長尾 一馬 | 京都大学大学院 理学研究科 |
| PS-76 | Active matterとしての神経幹細胞 上道 雅仁 | 東京大学大学院 理学系研究科 |
| PS-77 | ユニバーサル断熱量子計算 高木 隆司 | 東大関連基礎 MIT Physics Ph.D 1年生 (9月から) |
| PS-78 | エキシトン超伝導の理論的予測 宮藤 大輔 | 東京大学大学院 理学系研究科 |
| PS-79 | タイトル未定 草場 哲 | 京都大学大学院 理学研究科 |
| PS-80 | タイトル未定 市村 純一 | 東北大学大学院 理学研究科 |
| PS-81 | タイトル未定 鳩村拓矢 | 東京大学大学院 理学系研究科 |
| PS-82 | タイトル未定 高以來 優 | 九州大学 理学府 |
| PS-83 | カイラル強弾性体Ca ₂ Sr(C ₂ H ₅ CO ₂) ₆ における結晶構造カイラリティに対する一軸圧印加効果 上田 大貴 | 大阪大学大学院 基礎工学研究科 |

光格子系における回折限界を超えた位置測定方法

蘆田祐人

東京大学理学系研究科

近年、冷却原子の光格子系において単一格子レベルでの観測を可能にする、光格子原子顕微鏡が実現された[1,2]。この技術は、量子系の非平衡ダイナミクスや量子臨界現象を高精度で測定するための方法として、冷却原子系において重要な技術となりつつある。しかし、現在の光格子原子顕微鏡においては回折限界に起因するいくつかの困難があり、例えば光誘起非弾性散乱により各サイトの原子数の偶奇のみしか分からない破壊的なパリティ測定になってしまうという問題点などがあった。

発表ではこれらの問題点を克服し、非破壊な単一格子レベルでの原子位置測定を行う測定方法について紹介する[3]。レンズを介した非共鳴散乱光の連続測定により、量子多体状態の波束の収縮を引き起こし、収縮の様子を追跡する事で回折限界を超えた原子の位置情報が引き出せる事を示す (図 1)。特に、パウリの排他律によりフェルミオンの方がボゾンよりも波束の収縮が速くなることを示す。さらに、古典系に対しても我々の方法を拡張する事で回折限界を超えられる事を示し、特に生命科学における超高分解能顕微鏡への応用[4]についても説明する。

[1] W. S. Bakr et al., Nature 462, 74 (2009). [2] C. Weitenberg et al., Nature 471, 319 (2011). [3] Y. Ashida and M. Ueda, arXiv: 1409.8399. [4] Y. Ashida and M. Ueda, arXiv: 1505.00507.

PS- 02

汎関数くりこみ群の形式化と応用

東京工業大学大学院 理工学研究科 物性物理学専攻

中島 拓夫

Formulation and Application of Functional Renormalization
Group

Department of Physics, Tokyo Institute of Technology

Takuo Nakashima

Keywords : 汎関数くりこみ群、Wetterich の方程式、truncation、BCS-BEC クロスオーバー

汎関数くりこみ群とは、1993年に Wetterich によって導入されたくりこみ群解析の手法である。エネルギースケールを変化させた時に有効作用がどのように変化するかに着目することで、厳密な方程式を立てることができる。この厳密な方程式は Wetterich の方程式と呼ばれ、次のような汎関数微分方程式、

$$\partial_k \Gamma_k[\Phi] = \frac{1}{2} \text{STr} \left[(\partial_k R_k)(\Gamma_k^{(2)} + R_k)^{-1} \right] \quad (1)$$

で表される。 $\Gamma_k[\Phi]$ はカットオフ項が加わった有効作用であり、 k はエネルギースケールを表すパラメーターである。 R_k はカットオフ関数とよばれ、通常は

$$R_k(q) \rightarrow \infty \quad (k \rightarrow \infty) \quad (2)$$

$$R_k(q) \rightarrow 0 \quad (k \rightarrow 0) \quad (3)$$

$$R_k(q) \sim k^2 \quad (q \rightarrow \infty) \quad (4)$$

となるように選ぶ。 $\Gamma_k^{(2)}$ は有効作用の2階の汎関数微分である。STr は添え字に関する和と運動量に関する積分を表し、フェルミオン場に対しては(-1)をかける操作を行う。適切な truncation をとることで、方程式(1)から結合定数のフロー方程式が得られる。ここでいう truncation とは、有効ポテンシャルを低次で打ち切る、高次の頂点関数を無視する、頂点関数の運動量依存性を無視するといった近似をひとくくりにした呼び方である。

Wilson のくりこみ群と同様に、汎関数くりこみ群も相転移・臨界現象の理解に役立つ。汎関数くりこみ群が導入された当初は基礎物理への適用が主だったが、近年では物性物理への応用も行われている。今回は、[1]をもとに汎関数くりこみ群の方程式(1)の導出と(1)式からフロー方程式をどのようにして得られるか、そして具体的な応用例について解説する。応用例としてはBCS-BECクロスオーバーを予定している。従来の手法と比較し、汎関数くりこみ群によって精度のよい結果が出せることを説明する。

[1] S. Flörcinger, PhD thesis, University of Heidelberg, 2009, e-Print: arXiv:0909.0416 [cond-mat.quant-gas]

ラビ結合した 2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体における

対向超流動のエネルギー的な安定性

大阪市立大学 理学研究科

臼井 彩香, 竹内 宏光

Stability of Countersuperflow in binary Bose-Einstein condensates
under Rabi coupling

Department of Physics, Osaka City University

Ayaka Usui and Hiromitsu Takeuchi

Keywords: 2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体・対向流・コヒーレントな結合・ソリトン

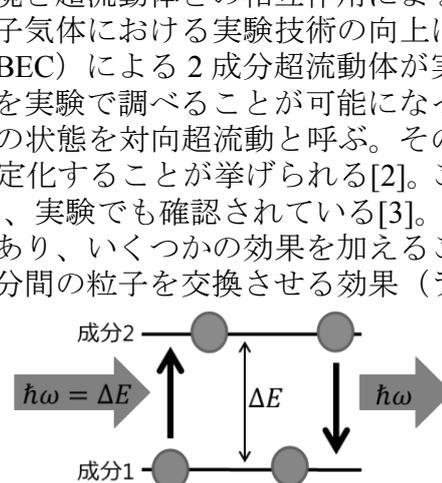
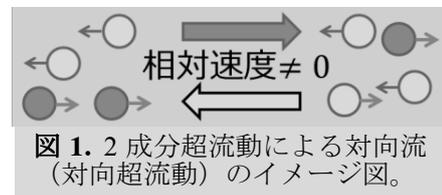
本研究は、ラビ結合したボース・アインシュタイン凝縮体における対向流のエネルギー的な安定性を明らかにすることが目的である。以下、本研究のイントロダクションを行う。

ボース・アインシュタイン凝縮体における特徴的な現象の 1 つとして、超流動がある。超流動とは粘性のない流れであり、Landau や多くの研究者がその性質、特にその不安定性について調べてきた。超流動は常に安定なわけではなく、例えば環境との相対速度がある臨界値を超えると不安定化する[1]。このような、環境と超流動体との相互作用による超流動への影響は長年調べられてきたが、近年、冷却原子気体における実験技術の向上により、2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体 (2 成分 BEC) による 2 成分超流動体が実現され、超流動体同士の相互作用による超流動性の変化を実験で調べることが可能になった。

2 成分超流動体において、成分間の相対速度が有限の状態を対向超流動と呼ぶ。その特徴として、成分間の相対速度が臨界値を超えると不安定化することが挙げられる[2]。これは超流動体同士の相互作用の影響が現れた結果であり、実験でも確認されている[3]。

冷却原子気体による 2 成分 BEC には他にも特徴があり、いくつかの効果を加えることが実験的に可能である。その 1 つが 2 成分 BEC に成分間の粒子を交換させる効果 (ラビ結合) であり、各成分間の凝縮体波動関数における相対位相を変化させる働きがある。

今回は、ラビ結合した対向超流動のエネルギー的な安定性について調べた。もう少し詳しく述べる。対向超流動の不安定化は成分間の相対速度で決まっていたが、ラビ結合したときはラビ結合の強さにも依存するはずである。ラビ結合が安定性をどのように記述するのかを調べた[4]。ポスター発表では、その数値的な結果と解析的な結果について説明する。



[1] I. M. Khalatnikov, *An Introduction to the Theory of Superfluidity* (Perseus, New York, 1965).
 [2] C. K. Law, C. M. Chan, P. T. Leung, and M.-C. Chu, *Phys. Rev. A* **63**, 063612 (2001).
 [3] C. Hamner, J. J. Chang, P. Engels, and M. A. Hoefer, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 065302 (2011).
 [4] A. Usui and H. Takeuchi, arXiv:1503.04010 (accepted for publication in *Phys. Rev. A*).

PS- 04

二成分 Fermi-Fermi 混合気体の集団励起 -collisionless 領域から流体力学領域まで-

東京理科大学^A, 二国研究室^B

成嶋優人^A, 渡部昌平 二国徹郎^B

collective modes in two-component Fermi-Fermi mixture gases
-from collisionless regime to hydrodynamic regime-

Nikuni group^A, Tokyo University of Science^B

M.Narushima^A, H.Watabe, T.Nikuni^B

Keywords : 物理, 第ゼロ音響, 第一音響, physics, zero sound, first sound

冷却原子気体を念頭に、二成分量子混合気体の集団励起の性質を発表する。第零音波の存在を理論的に予測した Landau の Fermi 液体理論では、粒子数と質量の等しい二成分 Fermi 系を考えて音速などを解析するのが通例である。しかしながら、現在の冷却原子気体の分野では質量、粒子数、相互作用パラメータを自在に選択することが可能であり、spin drag の性質などさまざまな実験が行われている。本研究では質量、粒子数が異なる 2 成分 Fermi 混合系を用い、collisionless 領域から流体力学領域への集団励起の振る舞いを理論的に予測する。流体力学領域では、同位相で揺らぐ第一音波は伝搬するが逆位相のスピンの波は粒子拡散、熱拡散の効果により著しく減衰する。しかし、量子統計性が顕著な極低温での collisionless 領域では、spin wave の伝搬が可能であると考えられる。モーメント法を適用した Boltzmann 方程式によって、これら混合気体ならではの性質を明らかにし、これを報告したい。

[1] Shohei Watebe, Aiko Osawa, Tetsuro Nikuni, J Low. Temp. **158**, 773-805

[2] T.Nikuni, A.Griffin, J.Low Temp.PHys. **111**, **793**(1998)

マルチフェロイック物質 $h\text{-(Lu}_{0.5}\text{Sc}_{0.5})\text{FeO}_3$ の単結晶育成と

その強的秩序ドメインの観測

東大新領域^A, 理研 CEMS^B鷲見浩樹^A, 阿部伸行^A, 賀川史敬^B, 徳永祐介^A, 有馬孝尚^A**Single Crystal Growth of Multiferroic Material $h\text{-(Lu}_{0.5}\text{Sc}_{0.5})\text{FeO}_3$
and the Observation of Ferroic Domain Distribution.***Dept. of Frontier Sciences Univ. Tokyo, RIKEN Center for CEMS***H. Sumi^A, N. Abe^A, F. Kagawa^B, Y. Tokunaga^A and T. Arima^A****Keywords: multiferroics, toroidal moment, hexagonal rare earth ferrite**

Ferroelastic, ferroelectric and ferromagnetic orders are collectively called “ferroic” order. These three ferroic orders are applied to shape memory alloys or memory devices in computers. These applications are realized by observing and controlling ferroic domain distribution, so the observation and control of ferroic domain are important not only for academic researches but also for industrial applications.

If these ferroic orders are classified by the parity of time-reversal and space-inversion symmetries, another ferroic order can be considered. Such a ferroic order is ferrotoroidic, which consists of toroidal moments. Toroidal moment is defined as a vortex of magnetic moments. This new ferroic order was reported in LiCoPO_4 [1].

Recently, it was reported that hexagonal rare earth ferrite $h\text{-RFeO}_3$ (R: Sc, Y, La-Lu) film showed ferroelectric and ferromagnetic orders simultaneously [2]. Moreover, the magnetic structure implies the ferrotoroidic order. But there is no report on a bulk single crystal of hexagonal rare earth ferrite and the observation of ferroic domain distribution.

In this presentation, I report the success in a bulk single crystal of $h\text{-(Lu}_{0.5}\text{Sc}_{0.5})\text{FeO}_3$ (h-LSFO) (Fig. 2) and the observation of ferroelectric domain distribution by piezoresponse force microscopy (Fig. 3).

[1] B. V. Aken *et al.*, Nature **449**, 702-705 (2007)

[2] W. Wang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 237601 (2013)

[3] S. M. Disseler *et al.*, PRL **114**, 217602 (2015)

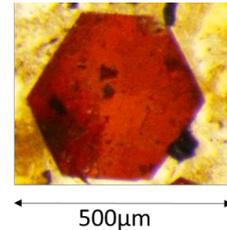


Fig.2: Single crystal of h-LSFO

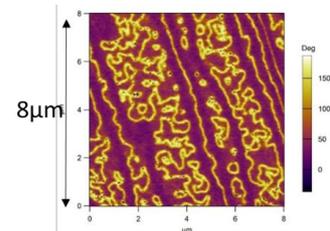


Fig.3: FE domain distribution of h-LSFO in the (001) surface. The color contrast means the direction of polarization along [001].

PS- 06

温度勾配によって誘起されたスピン波スピントルクの線形応答理論

名古屋大学理学研究科

山口皓史、河野浩

Linear Response Theory of Spin Wave Spin Torques due to temperature gradient

Department of physics, Nagoya University

Terufumi Yamaguchi, Hiroshi Kohno

Keyword：スピントロニクス、スピン波、スピントルク

スピン波は、スピン流やスピントルクといったスピントロニクスの基礎的な研究の対象であると同時に、絶縁体中でも伝播することから、ジュール熱を伴わない省エネルギーデバイスなど、応用の観点からも重要な研究の対象となっている。基礎と応用の両方から重要とされている研究のひとつとして、スピン波による磁壁などの磁化構造の駆動があり、その機構についての研究が行われている [1,2,3]。

一方、温度勾配がある場合の磁壁の駆動が実験で観測されているが [4]、その詳細な機構についてはいまだ解明されていない。考えられる機構のひとつとして、スピン波によるスピントルクがある。温度勾配は伝播するスピン波を誘起し、それが運ぶスピン流により、スピントルクを生むと考えられる。このスピン波によるスピントルクについて、現象論的な方程式 (確率的 Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式) に基づいてスピントランスファートルクと β -項についての計算がなされている [5]。

今回我々は、線形応答理論に基づいてスピン波によるスピントルクを定式化し、具体的に計算を行う。温度勾配に対する線形応答理論は、Luttinger[6] に従い重力ポテンシャルを導入することで定式化をする。また、磁壁などの具体的な磁化構造に適用し、その振る舞いを議論する。

[1] D.-S. Han et al., Appl. Phys. Lett. 94, 112502 (2009).

[2] S.-M. Seo et al., Appl. Phys. Lett. 98, 012514 (2011).

[3] J. Iwasaki et al., Phys. Rev. B 89, 064412 (2014).

[4] L. Berger, Appl. Phys. Lett. 58, 450 (1985).

[5] A. A. Kovalev, Phys. Rev. B 89, 241101(R) (2014).

[6] J. M. Luttinger, Phys. Rev. 135, A1505 (1964).

PS-07

超強磁場下での二次元直交ダイマー物質 $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ の比熱測定

秋元昂

東京大学物性研究所 国際強磁場科学研究施設

The measurement of the specific heat of the orthogonal-dimer antiferromagnet $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ at the ultra high magnetic field

CrNb₃S₆ 中におけるジャロシンスキー-守谷相互作用と

カイラル磁性

東京大学理学研究科物理学専攻

徳宿 邦夫

Department of Physics, University of Tokyo

Kunio Tokushuku

**Keywords: ジャロシンスキー-守谷相互作用, カイラル磁性, CrNb₃S₆ ,
Dzyaloshinsky-Moriya interaction, Chiral magnetism**

本研究では,実験的にカイラル磁性体であることがわかっている CrNb₃S₆ について,その微視的起源を明らかにする.一般にカイラル磁性体においてはジャロシンスキー-守谷相互作用(以下 DM 相互作用と書く)が重要な働きを担う.DM相互作用はジャロシンスキーにより現象論的に提唱され守谷によってもスピン軌道相互作用があまり大きくない系で微視的な起源が明らかにされた. CrNb₃S₆ 中においても DM 相互作用が大きな影響を与えることが予測されるが,伝導層が存在するため局在スピンのみを対象とした守谷理論をそのまま適応することはできない.そこで本研究では,結晶場および伝導電子を考慮したミクロな導出からクロム間に働く有効相互作用を導出し,それを用いて物質全体の秩序状態を議論する.

PS- 09

ハニカム格子上的の J_1 - J_2 量子ハイゼンベルグモデル に対するボンドランダムネスの効果

阪大理^A

上松和樹^A, 川村光^A

Spin-Liquid State of the Random J_1 - J_2 Heisenberg
Antiferromagnet on the Honeycomb Lattice

Osaka-univ^A

K.Uematsu^A and H.Kawamura^A

Keywords : 2次元量子スピン, フラストレーション, ランダムネス

近年の磁性研究においては、系のいくつかの最適条件が競合することでゆらぎが増大されるという、「フラストレーション」の効果が生む新奇な状態が注目されている。2次元ハニカム格子は、最近接相互作用の本数が3つしかなく、その少なさによって「量子ゆらぎ」の効果を非常に強く受けるため、反強磁性的な相互作用をしている場合、スピンの縮みが2次元系の中で最も顕著に表れる。さらに、反強磁性的な最近接相互作用 J_1 だけでなく、反強磁性的な次近接相互作用 J_2 をパラメータとして加える事で系にフラストレーションを生じさせると、あるパラメータ領域では古典的なネール秩序が壊されて、絶対零度においても磁気秩序を持たない非磁性状態となるという報告がなされている。すなわち、秩序状態を J_2 というパラメータによってある程度調整することができ、そしてフラストレーションを生じたハニカム格子では、様々な基底状態が提案されている。

本研究では、ハニカム格子上的の J_1 - J_2 量子ハイゼンベルグモデル ($s = 1/2$) に対して、さらに相互作用の大きさをランダムに与えるという自由度を導入することで、「フラストレーション」「量子ゆらぎ」「ランダムネス」がどのような状態を生起するかに着目し、ネール秩序および非磁性状態に対するランダムネスの効果を J_2 というパラメータによって系統的に調べた。計算は TITPACK Ver.2 を用いて厳密対角化を行った。その結果ある程度のランダムネスがあると、かなり広い範囲の J_2 に対して、ランダムシングレット相と呼ばれる非磁性状態が基底状態となる結果が得られた。この結果を三角格子やカゴメ格子といった、他のフラストレーション格子系に対するランダムネスの効果を調べた先行研究の結果と比較すると、これらの系で見られていたランダムシングレット相はより普遍的に生じるものだと分かった。

[1] K. Watanabe et al, J. Phys. Soc. Jpn. 83, 034714 (2014).

[2] H. Kawamura et al, J. Phys. Soc. Jpn. 83, 103704 (2014).

光誘起相転移：非平衡下での新たな物性探索

京大理
高三 和晃

Photo-induced phase transition : Search for new states of matter in non-equilibrium

Dept. of Phys. Kyoto Univ.
Kazuaki Takasan

Keywords : 光物性・強相関電子系・トポロジカル相・Floquet 理論

強いレーザー光を物質に照射すると、電子の運動量やスピン、結晶の格子振動が変化する。そして、電子間相互作用や電子-格子相互作用によって、小さな変化は集団的な応答へと成長し、物質のマクロな性質（電気伝導性・金属光沢など）を変化させる。これを**光誘起相転移**と呼ぶ。光誘起相転移は強い外場によって駆動される**非平衡現象**である。非平衡現象においては、緩和過程における準安定状態などの平衡系とは異なる状態が現れるため、これまでにない新たな物質相を探索する舞台として精力的に研究がなされてきた。

特に近年になって、これまでに無い新たなタイプの光誘起相転移が見出され、**光誘起相転移の研究は新たな展開を見せている**。光を照射した際、多くの場合はエネルギーとエントロピーが増大し、低温相から高温相、秩序から無秩序へ向かう。それに対して、新たなタイプの光誘起相転移では、光を照射することで“秩序”が誘起される。例えば、光によって電子状態のトポロジが変化して光誘起量子 Hall 相が誘起されたり[1]、光が電子の運動を“凍結”させることで電荷秩序絶縁体が実現されたりする[2]。こうした現象においては、周期駆動系の振る舞いを説明する Floquet 理論における、ある種の非平衡定常状態が重要な役割を果たす。

本発表では、光誘起相転移のこれまでの研究を振り返った上で、Floquet 理論を中心にいくつかの近年の発展をレビューする。いかに相転移が起こるのか、Floquet 理論の基本的内容から説明したい。最後には、発表者による光誘起相転移に関する研究内容も合わせて紹介する。

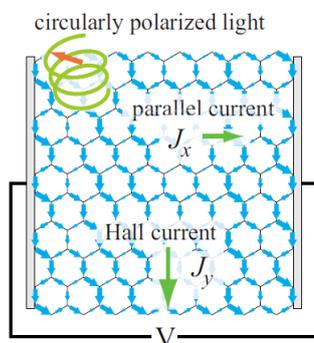


図 1 : グラフェンにおける光誘起量子 Hall 効果[1]

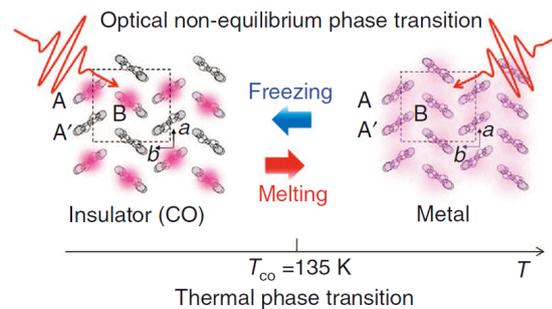


図 2 : 有機導体における電荷秩序の光融解・光凍結現象[2]

[1] T. Oka and H. Aoki, Phys. Rev. B, **79**, 081406 (2009).

[2] T. Ishikawa *et al.* Nat. Commun. **5**, 5528 (2014).

K₂NiF₄ 型構造を持つ Sr₂VO₄ の磁性と構造

名大院理^A, 物材機構^B, 国立中山大^C, 茨城大フロンティア^D

加藤優介^A, 清水康弘^A, 小林義明^A, 伊藤正行^A, 松下能孝^B, 桜井裕也^B,
高莚蕙^{B,C}, 楊弘敦^{B,C}, 吉田幸彦^D, 星川晃範^D, 石垣徹^D

Magnetic and structural properties of Sr₂VO₄ with the K₂NiF₄-type structure

Dept. of Phys., Nagoya Univ.^A, NIMS^B,

National Sun Yat-Sen Univ.^C, Frontier Research Center, Ibaraki Univ.^D

Yusuke Kato^A, Yasuhiro Shimizu^A, Yoshiaki Kobayashi^A, Masayuki Itoh^A,

Yoshitaka Matsushita^B, Hiroya Sakurai^B, Ting-Hui Kao^{B,C}, Hung-Duen Yang^{B,C},

Yukihiko Yoshida^D, Akinori Hoshikawa^D, Toru Ishigaki^D

Keywords: 実験系、強相関電子系

強相関電子系では、しばしば、軌道自由度によって非自明な磁気的性質が発現する。K₂NiF₄ 構造を持つ Sr₂VO₄ は、 $d_{xz/yz}$ 軌道を 3d 電子 1 つが占有したモット絶縁体で、軌道自由度に起因して磁気八極子秩序[1]やストライプ状スピン・軌道秩序[2]などの新奇な基底状態が理論的に予想されている物質である。これまでに、室温で I4/mmm の空間群を持つ構造が 120K から 100K にかけて対称性を維持したまま c 軸方向へと伸長することが報告されている[3]。また、 μ SR 実験により 10K 付近での反強磁性秩序が観測されている[4]ものの、低温相の磁性に対してどのようなモデルが妥当であるか明らかになっていない。我々は、これまでに、核磁気共鳴実験(NMR)や中性子散乱実験などを行い、磁気的性質と結晶構造の両方の観点からこれを明らかにしようと取り組んできた。

⁵¹V 核の NMR 実験からは、低温相で ⁵¹K ~ 0% のスペクトルが観測され、また、スペクトルの一部がワイプアウトされていることから、大きな磁気揺らぎを伴う非磁性状態が示唆される。中性子散乱実験と X 線回折実験から得られた結晶構造を含めて、この系の基底状態について議論したい。

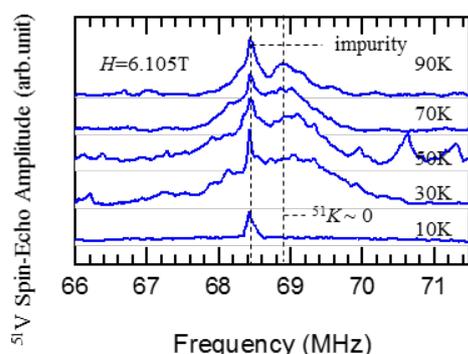


図 1. 低温相における ⁵¹V 核 NMR スペクトル

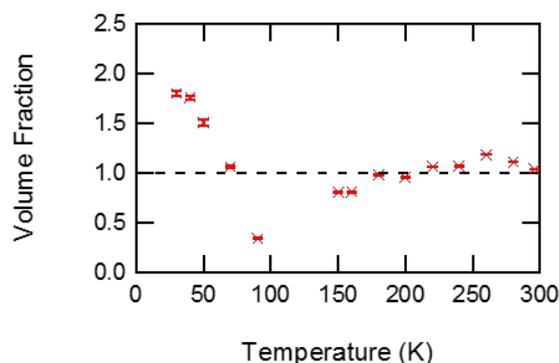


図 2. スペクトル強度の体積分率の温度依存性

[1] G. Jackeli *et al.*, Phys. Rev. Lett. 103, 067205 (2009). [2] Y. Imai *et al.*, Phys. Rev. Lett. 95, 176405 (2005). [3] H. D. Zhou *et al.*, Phys. Rev. Lett. 99, 136403 (2007). [4] J. Sugiyama *et al.*, Phys. Rev. B. 89, 020402(R) (2014).

レーザー角度分解光電子分光による FeSe の軌道秩序状態における超伝導ギャップ異方性の観測

東大物性研, 東大工^A, 東理大総合研^B, 中国科技院^C, 京大理^D, 東大新領域^E, KIT^F

橋本嵩広, 大田由一, 山本遇哲, 鈴木裕也^A, 下志万貴博^A, 渡部俊太郎^B, C.-T.Chen^C, 綿重達也^D, 小林遼^D, 笠原成^D, 松田祐司^D, 芝内孝禎^E, A. Bohmer^F, T. Wolf^F, P. Adelman^F, C. Meingast^F, H. v. Loehneysen^F, 岡崎浩三, 辛埴

Observation of superconducting gap anisotropy of FeSe in orbital ordered state by laser ARPES

Univ of Tokyo ISSP, Univ of Tokyo Dept. of App. Phys.^A, Tokyo Univ of Sci^B, Chinese Academy of Science^C, Univ of Kyoto^D, Univ of Tokyo Frontier Sciences^E, KIT^F

Takahiro Hashimoto, Yuichi Ota, Haruyoshi Yamamoto, Yuya Suzuki^A, Takahiro Shimojima^A, Shuntaro Watanabe^B, C.-T.Chen^C, Tatsuya Watashige^D, Ryo Kobayashi^D, Shigeru Kasahara^D, Yuji Matsuda^D, Takasada Shibauchi^E, A. Bohmer^F, T. Wolf^F, P. Adelman^F, C. Meingast^F, H. v. Loehneysen^F, Kozo Okazaki, Shin Shik

Keywords : d 電子系, 鉄系超伝導体, 光電子分光, 超伝導対称性および発現機構

鉄系超伝導体 FeSe は 90K 以下で軌道秩序を形成し、10K において超伝導転移を示す。軌道秩序形成に伴いフェルミ面形状が 4 回対称から 2 回対称へと変化する様子が過去の角度分解光電子分光から報告されている。今回我々は、このような回転対称性の破れたフェルミ面における超伝導状態を調べるために、FeSe 単結晶を用いたレーザー角度分解光電子分光を行い、超伝導ギャップ異方性の詳細な観測を試みた。

Pr 系銅酸化物 $\text{Pr}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15-\delta}$ の超伝導性質に対する還元効果

新潟大学大学院自然科学研究科^A, 新潟大理学部^B, 新潟大超域^C
 芳志戸諭^A, 因幡教信^A, 石川文洋^B, 山田裕^B, 中山敦子^C, 大村彩子^C

Reduction effect on superconductivity of Pr-based cuprate $\text{Pr}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15-\delta}$

^A*Grad.sch.of Sci.&Tech.,Niigata Univ.*, ^B*Dept.of Phys.,Niigata Univ.*

^C*Cen.for Transdisciplinary Res.,Niigata Univ.*

S. Hoshito^A, K. Inaba^A, F. Ishikawa, Yuh Yamada, A. Nakayama, A. Ohmura

Keywords: Pr 系銅酸化物超伝導体, Pr-based Superconductor,

最も有名な銅酸化物超伝導体である Y 系銅酸化物は、90K 級の超伝導転移温度 T_c を持つ。Y サイトの希土類元素による置換効果により、Pr 置換によってのみ超伝導性が抑制されることが明らかになった。これは、Pr-4f 軌道と O-2p 軌道の混成による CuO_2 面でのキャリアの局在によるものだと考えられている。この局在により $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ は、電気抵抗において半導体的な振る舞いを示す。しかし近年、Yamada らによって、還元された $\text{Pr}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15-\delta}$ (Pr247) において、 $T_c=15\text{K}$ 付近で超伝導転移が出現することが報告された。[1] この超伝導は従来の銅酸化物超伝導における CuO_2 面で超伝導が発現とは異なり、Pr247 では、 CuO ダブルチェーンと呼ばれる鎖状構造上で超伝導が発現していると考えられている。Pr247 を還元処理することによって、 CuO シングルチェーンで酸素欠損が起こり、 CuO_2 面を介して CuO ダブルチェーンにキャリアがドーピングされた結果であると考えられている。

我々の研究室では、Pr247 を高圧酸素下で合成を行ってきた。しかし、Pr247 が単相として存在する焼成温度、酸素圧領域は非常に狭いため、Pr247 単相試料の合成は困難である。本研究では、良質な Pr247 多結晶試料の焼成を目指し従来の焼成条件を見直して焼成温度 946°C 、酸素圧 0.52MPa 、焼成時間 60h の条件の下で試料を焼成した。この試料を 400°C 、真空中で加熱する還元処理を行った。この還元した Pr247 多結晶試料について超伝導量子干渉型磁束計 (SQUID 磁束計) を用いて磁化率を測定した。この発表では還元処理による超伝導性への影響を議論する。

[1] Yuh Yamada, A. Matsushita, *Physica C* **426-431**,213-219.

層状マンガン酸化物における表面によって誘起された
2つのフリーデル振動の干渉現象

首都大院理工

山村 諒祐、堀田 貴嗣

Interference between two surface-induced Friedel oscillations
in layered manganites

Dept. of Phys. ,TMU

Ryosuke Yamamura and Takashi Hotta

Keywords: マンガン酸化物, d 電子系, フリーデル振動, 表面, 電荷構造

近年、マンガン酸化物はその酸化還元反応と安価で手に入ることから、Li イオン電池の正極材料や人工光合成の触媒への応用に注目が集まっている。これらの物質として機能するのは、主に Mn^{4+} が Mn^{3+} に変化する時であるから、結晶の表面に Mn^{4+} がより多く存在していれば、その性能が上昇することが期待される。そこで我々は、z 方向に表面のある層状マンガン酸化物を考え、磁気構造を仮定して各層の Mn^{4+} の数の変化を調べた。

本研究では、局在 t_{2g} スピンと結合する遍歴的な e_g 電子に対する二重交換模型を考えるが、 t_{2g} スピンと e_g 電子間のフント結合は無限大とし、ヤーン・テラー効果や電子間クーロン相互作用は無視する。この場合、ハミルトニアンは以下ようになる。

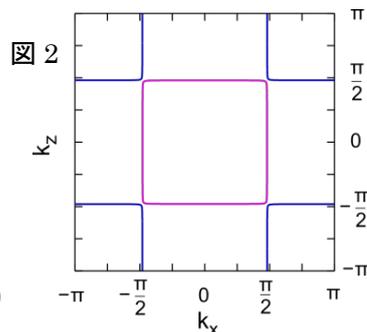
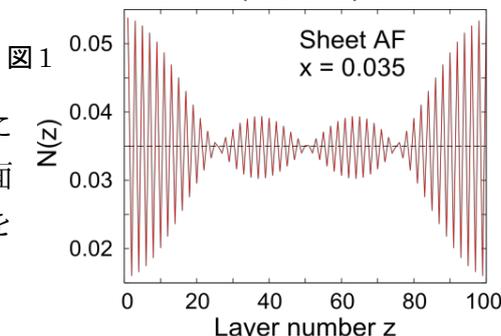
$$H = \sum_{i\alpha\gamma\gamma'} D_{i,i+a} t_{\gamma\gamma'}^a c_{i\gamma}^\dagger c_{i+a\gamma'} + J_{AF} \sum_{\langle i,j \rangle} S_{zi} S_{zj}$$

(i,j: サイト γ, γ' : e_g 電子の軌道 $t_{\gamma\gamma'}^a$: ホッピング S_{iz} : t_{2g} イジングスピン ± 1)

$D_{i,i+a} = (1 + S_{zi} S_{zi+a})/2$ である。ここでは、周期期的境界条件を課した 1000×1000 格子を、主に z 方向に 100 層重ねた積層構造を考える。

強磁性領域が x-z 平面の 2 次元的になる磁気構造では、各層の Mn^{4+} の数は z 軸方向のネスティングベクトルを波数とするフリーデル振動を示し、表面に Mn^{4+} が多く現れる。特に、ホールドープが非常に小さい場合、各層の Mn^{4+} の数はうなりのような振動を見せる(図 1)。x はホールドープの量であり、 $N(z)$ は z 層のサイト当たりの平均の Mn^{4+} 数である。この時のフェルミ面を図 2 に示す。フェルミ面は完全ネスティングに近く、2 つのネスティングベクトルは非常に近い値を持つが、今 z 方向に 100 層積まれた系を考えているのでその差は $2\pi/100$ の整数倍に制限される。波数に $n \times (2\pi/100)$ だけの差をもつ 2 つのフリーデル振動が干渉し、図 1 のよう

なうなりを発生させる。
また強磁性領域が 3 次元になる磁気構造において、表面に軌道秩序が現れることを見出したので、報告する。



多バンド超伝導におけるバンド間結合への強相関効果

京都大学理学研究科理論グループ

橋本和樹

**Effect of strong correlation of band coupling on multiband
superconductivity**

*Condensed Matter Theory Group, Department of Physics,
Graduate School of Science, Kyoto University*

Kazuki Hashimoto

Keywords: 強相関系, 多バンド, 鉄系超伝導

近年の鉄系超伝導の研究などを通して、複数のバンドにまたがった超伝導対形成を示す超伝導の物理が重要な題材になっている。例えば、s-d 軌道の 2 バンド系では各バンド上で定義された超伝導秩序変数間の結合（バンド間結合）があり、それぞれの秩序変数が弱結合することによる相対位相が動的変数になること（レゲットモード） [1]や、2 種類の半整数磁束渦の結合が起こる。ところが 2 バンド超伝導体の超伝導性に関する理論研究はこれまで摂動として扱う弱結合 BCS 理論に限られ、強相関系で期待される新たな特徴の調査はなされてこなかった。弱結合 BCS 理論の場合ではバンド間結合項の結合定数は温度や磁場に依存しない。しかし超流動ヘリウム 3 の理論などで知られる強結合（強相関）効果 [2] [3] を取り入れると、このバンド間結合の温度・磁場依存性が期待され、温度・磁場相図においてこの結合定数が符号を変える可能性がある。この符号変化が起きるときには、レゲットモードのソフトニング、2 種類の半整数磁束渦の解離、などが起きると期待される。このようにこれまで考えられていなかった超伝導相内での付加的な相転移の可能性が多バンド超伝導にある。

[1] A.J.Leggett, Prog.Theor.Phys.,36(1966)

[2] Brinkman et al., Phys. Rev. A 10, 2386 (1974)

[3] R.Ikeda, Phys. Rev. B 91, 174515 (2015)

3次元運動量分解光電子分光を用いた 重い準粒子状態観測手法の開発

阪大基礎工^A, 甲南大理工^B, 原子力機構量子ビーム^C,
SPring-8 / JASRI^D, 京産大理^E, 東大物性研^F, 静岡大理^G
中谷泰博^A, 荒谷秀和^A, 橘祥一^A, 森健雄^A, 山口貴司^A, 藤原秀紀^A,
木須孝幸^A, 山崎篤志^B, 保井晃^{C,D}, 斎藤祐児^C, 山上浩志^{C,E},
鶴田篤史^A, 宮脇淳^F, 海老原孝雄^G, 関山明^A

Development of the technique of
observing a heavy fermionic nature
by three dimensional angle-resolved photoemission spectroscopy
*Grad. Sch. of Eng. Sci., Osaka Univ.^A, Dep. of Phys., Konan Univ.^B,
Condens. Matter Research Unit, Japan Atomic Energy Agency^C,
SPring-8 / JASRI^D, Dep. of Phys., Kyoto Sangyo Univ.^E,
ISSP, Univ. of Tokyo^F, Dep. of Phys., Shizuoka Univ.^G*

Y. Nakatani^A, H. Aratani^A, S. Tachibana^A, T. Mori^A, T. Yamaguchi^A,
H. Fujiwara^A, T. Kiss^A, A. Yamasaki^B, A. Yasui^{C,D}, Y. Saitoh^C,
H. Yamagami^{C,E}, A. Tsuruta^A, J. Miyawaki^E, T. Ebihara^F and A. Sekiyama^A

Keywords : 実験, 放射光, SPring-8, 角度分解光電子分光, 4f 電子, 重い電子

強相関希土類化合物では, 伝導電子が 4f 電子と混成 (*c-f* 混成) することにより重い準粒子状態を形成し, 有効質量が重くなると考えられているが, このことを角度分解光電子分光 (ARPES) で観測する研究はあまり進んでいない. これは, 非常に狭いエネルギースケールの議論が必要になるだけでなく, 表面とバルクで *c-f* 混成強度が顕著に異なる [1] ため, 高エネルギー分解能であっても表面敏感な測定では観測が難しいためである. また参照物質を同条件で測定する研究もあまり行われていない. そこで我々は, 超伝導を示す [2] 重い電子系化合物 CeNi_2Ge_2 を取り上げ, f^0 配置の参照物質 LaNi_2Ge_2 とともに SPring-8 BL23SU においてバルク敏感な軟 X 線角度分解光電子分光を行うことで対照研究を可能にした. 図 1 に, LaNi_2Ge_2 及び CeNi_2Ge_2 の Γ -X 方向のバンド分散を示す. LaNi_2Ge_2 のバンドは放物線状のままフェルミ準位を切るのに対し, CeNi_2Ge_2 のバンドはフェルミ準位近傍で急激に曲がり, 傾きが小さくなる. これらの結果から, *c-f* 混成による重い準粒子状態の, エネルギー分解能 70 meV での直接観測に成功し, 電子分光としての具体的な方法論を示した. この測定手法は, 他の重い電子系化合物にも適用することが期待できる.

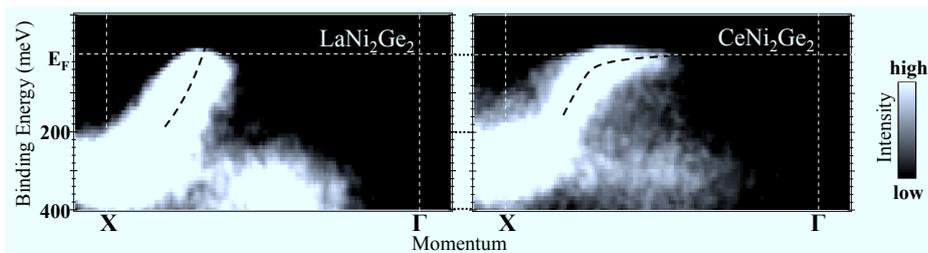


図 1: LaNi_2Ge_2 (左), CeNi_2Ge_2 (右) の ARPES 強度分布. 黒の点線はバンドを示す目印.

[1] A. Sekiyama *et al.*, Nature (London) **403**, 396 (2000).

[2] F. M. Grosche *et al.*, J. Phys. Condens. Matter **12**, L533 (2000).

グラフェンの超伝導電流

東京大学大学院理学系研究科
寒川崇生, 正木祐輔

Supercurrent of graphene

Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo

Takao Sangawa and Yusuke Masaki

Keywords: グラフェン, 超伝導, Graphene, Superconductor,

グラフェン(graphene)は2005年頃のGeimのグループ、およびKimのグループによる資料作成と、特異な量子ホール効果の発見^{1,2)}から始まった。グラフェン中の電子はそのバンド分散から質量を持たないディラック粒子と呼ばれ、ディラック電子系として大きな注目を集めており³⁾、さまざまな特殊な物性が報告されている。

私たちが研究したのは「グラフェンの超伝導電流」である。グラフェンの超伝導についてはすでに多くの研究が出ている。例えば、Uchoaらがグラフェンが超伝導になりうるのか⁴⁾について調べており、さらに超伝導電流についてはKopnin⁵⁾や、Mizoguchi⁶⁾らによる報告がある。私たちは彼らとは異なる手法で超伝導電流にアプローチした。その手法はScalapinoらによって提案された方法である⁷⁾。Scalapinoらは正方格子ハバードモデルにおいて系が絶縁体、金属、超伝導のいずれになるかを電流電流相関関数から決定しているが、その主張を六方格子であるグラフェンに適用した。

今回はScalapino理論のレビューと、グラフェンへ拡張した結果について紹介する。

[1] K.S.Novoselov et al. ,Nature **438**,197 (2005); A.K.Geim and K.S.Novoselov, Nature Materials **6**,183 (2007); A.H.Castro Neto et al. , Rev. Mod. Phys. **81**, 109 (2009)

[2] Y.Zhang, et al. ,Nature **438** ,197 (2005)

[3] 例えば青木秀夫「ディラック電子」「グラフェンの物理」固体物理 **9** 及び **11**(2010)に解説がある。

[4] B.Uchoa and A.H.Castro Neto, Phys. Rev. Lett **98**, 146801 (2007)

[5] N.B.Kopnin and E.B.Sonin, Phys. Rev. B**82**, 014516 (2010)

[6] T.Mizoguchi and M.Ogata arxiv:1502.05769(2015)

[7] D.J.Scalapino et al., Phys. Rev. B**47**, 7995 (1993)

CeCoIn₅系トリコロール超格子による 空間反転対称性の破れの導入

京都大学大学院理学研究科

成塚政裕

Global inversion symmetry breaking in tricolor superlattice of
CeCoIn₅

Department of Physics, Kyoto University

Masahiro Naritsuka

Keywords : 強相関, 重い電子系, 超格子

空間反転対称性の破れた超伝導体は、重い電子系超伝導体である CePt₃Si[1] の発見を皮切りに近年注目されている。これらの系は Rashba 型のスピン軌道相互作用によりスピナー重項とスピン三重項の混成やヘリカル渦糸状態などの特異な超伝導状態が実現していると考えられている [2]。

しかし、自然界に存在する空間反転対称性の破れた重い電子系超伝導体は結晶構造が決まっているため空間反転対称性の破れの度合を調整することは困難である。

空間反転対称性の破れた超伝導体に対するアプローチの一つとして、人工的に 2 次元的な層状構造を積層させた超格子の作製がある。我々のグループではこれまでに重い電子系超伝導体 CeCoIn₅ と非磁性金属 YbCoIn₅ を用いて空間反転対称性の破れた超格子を作製した [3]。この超格子における上部臨界磁場の温度と角度依存性では、空間反転対称性の破れに起因したパウリ対破壊効果の抑制が観測されている。

本研究では、さらに大きな空間反転対称性の破れを導入するために重い電子系超伝導体 CeCoIn₅ を含む YbRhIn₅/CeCoIn₅/YbCoIn₅ の 3 種類の物質を繰り返し積層させたトリコロール超格子を作製した。超格子の成長には分子線エピタキシー法を用いた。X 線回折のピークとシミュレーションのピークは類似しており、設計通りの超格子の成長を確認した。発表当日は作製した超格子の上部臨界磁場から超伝導と空間反転対称性の破れの関係を議論する。

[1] E.Bauer *et al.*: Phys. Rev. Lett. **92** 027003 (2004)

[2] S. Fujimoto, J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 5

[3] M.Shimozawa *et al.*: Phys. Rev. Lett. **112** 156404 (2014)

強相関係におけるトポロジカル超伝導

京都大学大学院理学研究科

大同 暁人

Topological Superconductivity in Strongly Correlated Systems

Dept. of Phys., Kyoto Univ.

Akito Daido

Keywords : トポロジカル超伝導, 強相関係, d 波超伝導

強磁場下の2次元電子系でホール伝導度が量子化する量子ホール効果をはじめとして、系がトポロジカルに非自明な構造を持つために生じる様々な物性が、理論・実験の双方から盛んに提案され、精力的に研究されている。

トポロジカルに非自明な構造の例としては、平均場近似のもとでの時間反転対称性のある1バンド2次元超伝導体を考えるとわかりやすい。秩序変数がスピン-重項であるか、あるいは三重項で \mathbf{d} ベクトルが z 方向を向いている場合には、系のハミルトニアンは

$$H = \sum_{\mathbf{k}} \begin{pmatrix} c_{\mathbf{k}\uparrow}^\dagger & c_{-\mathbf{k}\downarrow} \end{pmatrix} H(\mathbf{k}) \begin{pmatrix} c_{\mathbf{k}\uparrow} \\ c_{-\mathbf{k}\downarrow}^\dagger \end{pmatrix} + \text{const.}$$

$$H(\mathbf{k}) = \begin{pmatrix} \epsilon(\mathbf{k}) & \eta(\mathbf{k}) \\ \eta(\mathbf{k}) & -\epsilon(\mathbf{k}) \end{pmatrix} = \sqrt{\epsilon(\mathbf{k})^2 + \eta(\mathbf{k})^2} \begin{pmatrix} \cos \theta(\mathbf{k}) & \sin \theta(\mathbf{k}) \\ \sin \theta(\mathbf{k}) & -\cos \theta(\mathbf{k}) \end{pmatrix}$$

の形に書くことができる。準粒子固有状態 $|u_{\pm}(\mathbf{k})\rangle = \begin{pmatrix} \cos(\theta/2 - \pi/2) \\ \sin(\theta/2 - \pi/2) \end{pmatrix}$ は Brillouin ゾーンから1次元円への写像を与えているので、 k_y を1つ固定して k_x を動かしたときの像が1次元円を何回まわるか、という量 ν を考えることができる¹。これは winding number (巻きつき数) と呼ばれるトポロジカル数の一つで、定義から整数値を取る。最も簡単な s 波超伝導体では常に $\nu = 0$ となることを示すことができ、その意味で、 $\nu \neq 0$ となるような場合には、系の状態が数学的に非自明な構造を持っていることになる。

上の例のように、系が何らかの意味でトポロジカルに非自明な構造を持つ場合には、境界のない系での電子状態の情報から境界のある系でのギャップレスなエッジ状態の存在が予言できたりといった、従来では考えられない物性が見られる。特に、トポロジカルに非自明な構造を持った超伝導体のことをトポロジカル超伝導体と呼んでいる。

さて、先行研究によって、電場と磁場が鉛直に印加された2次元系の d 波超伝導体が、トポロジカル周期表で特徴づけられるトポロジカル超伝導体になることがわかった (トポロジカル数はチャーン数)。本研究ではこの系に対する理解を深めるべく、この系の電場・磁場に対する相図を決定する。また、その他進展があった場合にはその内容についても議論する予定である。

[1] 「トポロジカル超伝導体入門」佐藤昌利, 物性研究 94, 311(2010)

¹正確には $|u_{\pm}\rangle$ の角度 $\theta/2$ そのものではなく θ が何回まわるかを数えている。 k_x が BZ を横切って戻ってきたときに θ は 2π の整数倍変化しうるので、 $|u_{\pm}\rangle$ 自体のまわった回数の量子化は半周単位である。今の場合、 u_{\pm} バンドの“ヒルベルト空間”(正確には独立な準粒子状態の集合)は半円で指定できてしまうが、角度を2倍すると円と1対1対応させることができる。この意味で、 θ の回転数を数えた ν は「ヒルベルト空間に何回巻きついているか」を数えていると解釈しても良い [1]。

グラフェン水素化原子欠損における近藤効果の観測法について

大阪大学 基礎工学研究科 草部研究室 修士 2 年^A, 福岡工大情報工^B

森下直樹^A, Gagus Ketut Sunnardianto^A, 丸山勲^B, 草部浩一^A

How to observe the Kondo effect at a hydrogenated graphene vacancy

^A Grad. Sch. Eng. Sci. Osaka Univ., ^BInformation and Systems Eng. Fukuoka Institute of Technology

MORISHITA Naoki^A, Gagus Ketut Sunnardianto^A, MARUYAMA Isao^B, and KUSAKABE Koichi^A

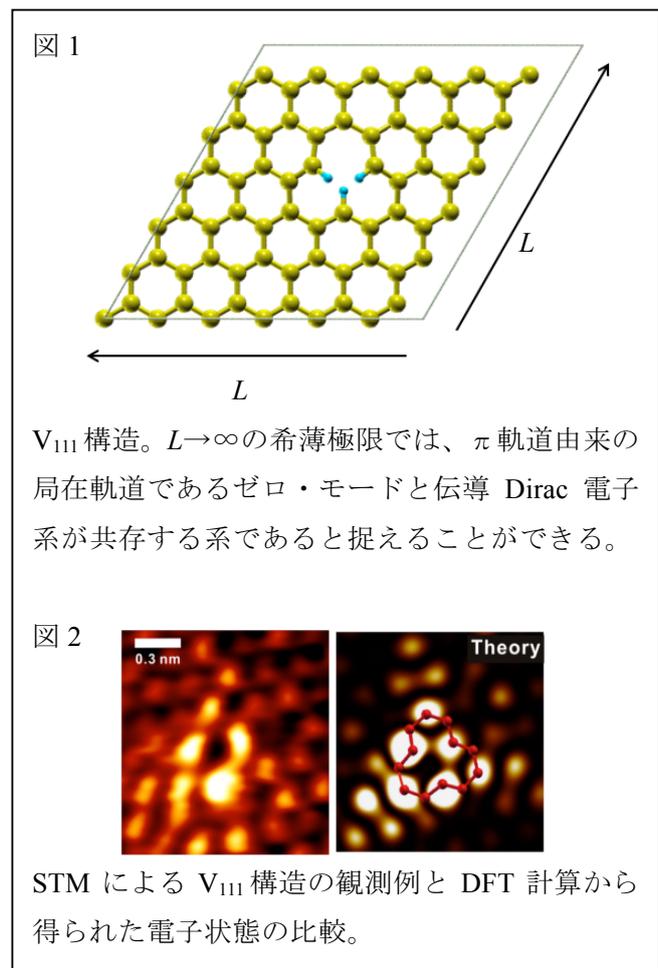
Keywords: グラフェン, 近藤効果, STM/STS, 単スピン観測

グラフェンの特定の格子欠陥構造には「エッジ・ステート」[1]や「ゼロ・モード」[2]等と呼ばれる特異な局在モードが現れることが知られている。

私達は、これらのグラフェン格子欠陥構造の中でも、最もシンプルな形で局在ゼロ・モードが現れるグラフェン三水素化原子欠損構造「V₁₁₁」(図 1)に着目し、電子の多体相互作用を DFT 計算により精密に評価した結果に立脚したモデルの数値的解析から、この構造に局在スピンと伝導電子の相互作用による「近藤効果」が発現することを突き止めた[3]。

V₁₁₁ 構造は、2014 年に STM 観測・DFT 計算の両面からその構造が完全に同定されている (図 2) [4]。しかしながら、V₁₁₁ におけるスピン偏極や近藤効果発現による伝導 Dirac 電子の変調が観測された例は未だに報告されていない。

今回のポスター発表では、グラフェンに局在するゼロ・モードにおける単スピン観測法や、Dirac 電子の状態密度の化学ポテンシャル・温度依存性の観測法などについて、実験家と活発な意見の交換を行いたいと考えている。



[1] M. Fujita, K. Wakabayashi, and K. Kusakabe, J. Phys. Soc. Jpn. 65, 1920 (1996)

[2] V. Pereira et al., Phys. Rev. 77, 115109 (2008)

[3] N. Morishita, G.K. Sunnardianto, K. Kusakabe et al., arXiv: 1412.8589 (2014)

[4] M. Ziatdinov et al., Phys. Rev. 87, 115427 (2014)

Sb 置換による $\text{NdO}_{0.7}\text{F}_{0.3}\text{BiS}_2$ 超伝導体の化学圧力効果

東理大理

大槻恵史, 出村郷志, 藤澤唯太, 坂田英明

Chemical Pressure Effect on $\text{NdO}_{0.7}\text{F}_{0.3}\text{BiS}_2$

Superconductor by Sb-substitution

Tokyo Univ. of Science

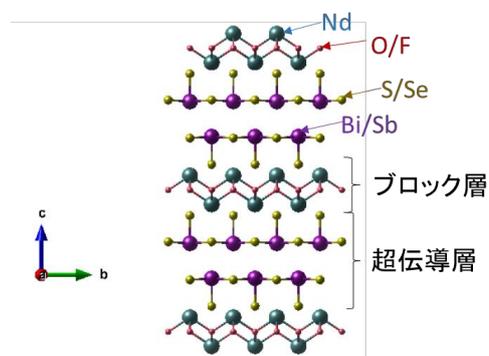
S. Otsuki, S. Demura, Y. Fujisawa, H. Sakata

Keywords: BiS_2 系超伝導体、化学圧力効果、 $\text{NdO}_{0.7}\text{F}_{0.3}\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{S}_2$

BiS_2 系超伝導体の一種である $\text{Ln}(\text{O,F})\text{BiS}_2$ ($\text{Ln}=\text{La,Ce,Pr,Nd,Sm,Yb}$) はブロック層と超伝導層が交互に積層した層状構造を有する [図 1]。 LnOBiS_2 はブロック層の酸素をフッ素に置換してキャリアドープをすると超伝導を示す。また、ブロック層の元素をイオン半径の小さい元素を置換して化学圧力(負の化学圧力)をかけることで転移温度が上昇することが報告されている [1-2]。一方、超伝導層にある S をイオン半径の大きい Se で置換して化学圧力(正の化学圧力)をかけると転移温度が下がるという結果が報告された [3]。これにより、負の化学圧力効果が転移温度の上昇に関連することが考えられる。

そこで、我々は超伝導層の元素置換による負の化学圧力効果に着目し、 $\text{NdO}_{0.7}\text{F}_{0.3}\text{BiS}_2$ の Bi を等原子価であり、Bi よりもイオン半径の小さい Sb で置換することにより負の化学圧力を印加し、結晶構造や転移温度がどのように変化するかを調べた。

具体的には、単結晶 $\text{NdO}_{0.7}\text{F}_{0.3}\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{S}_2$ ($0 \leq x \leq 0.2$) を合成し、X 線回折測定、電気抵抗率測定及び磁化率測定を行った。発表当日はこれらの実験結果から $\text{NdO}_{0.7}\text{F}_{0.3}\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{S}_2$ における負の化学圧力効果による構造変化と転移温度の関連性を議論する予定である。

図 1. BiS_2 系超伝導体の結晶構造。[1] Y. Mizuguchi *et al.*, J Phy. Soc. Jpn. **81** 114725 (2012).[2] J. Kajitani *et al.*, J Phy. Soc. Jpn. **84** 044712 (2015).[3] T. Hiroi *et al.*, J Supercond. Nov. Magn. **28** 1149 (2015)

重い電子系 CeRhIn₅/YbRhIn₅ 人工超格子を用いた

量子臨界性の精密制御

京大院理^A

石井智大^A

Controlling the quantum criticality in heavy fermion superlattices

CeRhIn₅/YbRhIn₅

^ADepartment of Physics, Kyoto University

T.Ishii^A

Keywords: 実験系 重い電子系 分子線エピタキシー法 人工超格子

絶対零度において圧力、元素置換、磁場といった非熱的なパラメータを変化させることにより熱的な揺らぎの効果を含まない相転移がおこる。このような相転移を量子相転移と言い、絶対零度での相の境界を量子臨界点(QCP)と言う。QCP 近傍では電気抵抗率や比熱などの振る舞いにおいてフェルミ液体的振る舞いから外れた非フェルミ液体的な振る舞いが観測されている。このため QCP の研究は凝縮系物理学の中心的な研究テーマの一つとなっている。

近年我々の研究グループでは重い電子系反強磁性体 CeIn₃ と非磁性金属 LaIn₃ を交互に積層させた人工超格子を作製し、*f* 電子を 2 次元に閉じ込めることで量子臨界性の人工制御に成功した。この超格子では CeIn₃ 層の厚みを薄くすることで反強磁性秩序が抑制され、特に CeIn₃ 層が 2 層の際、電気抵抗率の温度依存性で非フェルミ液体的な振る舞いが観測された[1]。

本研究では分子線エピタキシー法を用いて重い電子系反強磁性体 CeRhIn₅ (*m* 層)及び YbRhIn₅ (7 層)を交互に積層させた人工超格子を作製した (Fig.1)。CeIn₃/LaIn₃ 超格子と同様に CeRhIn₅ 層の減少に伴い *f* 電子の電子状態の次元性が低下し、反強磁性秩序が抑制されることが期待される。これらの試料に対して電気抵抗率の温度依存性測定を行うと層数の減少に伴い反強磁性転移温度 T_N の減少が観測された。この結果から CeRhIn₅ 層を低次元化することにより量子臨界性を人工的に制御することができたと考えられる。特に $m=3$ の試料に対して磁場を印加することで精密な量子臨界性の制御に成功した。当日は詳細な実験結果に関して報告する。

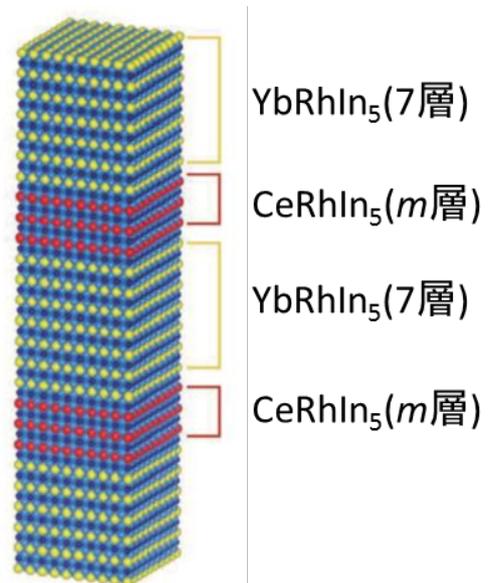


Fig.1 CeRhIn₅(*m*)/YbRhIn₅(7)人工超格子

[1]H.Shishido *et al.*, Science **327**,980 (2010)

PS- 23

乱雑位相近似による異方的超伝導の磁気励起の研究

島根大学大学院 総合理工学研究科

森脇将貴, 武藤哲也

The research on the magnetic excitation in anisotropic
superconductivity

by the random phase approximation

*Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering,
Shimane University*

Masaki Moriwaki and Tetsuya Mutou

Keywords : 異方的超伝導, 動的帯磁率, anisotropic superconductivity,
dynamical spin susceptibility

超伝導状態は、その励起エネルギーに有限のエネルギーギャップが存在することで特徴付けられる。従来の超伝導では電子間にフォノンを媒介した引力が働き、ギャップが等方的であることが知られている。本研究で対象とする銅酸化物高温超伝導体は、二次元正方格子 CuO_2 面を含む層状構造を持っており、超伝導を担うキャリアは CuO_2 面を伝導していると考えられている。この超伝導体のギャップは異方的で、その異方性は電子間引力が磁気揺らぎに起因することを反映していることが明らかにされた。従って、電子間引力の起源を詳しく調べるためには、系の磁氣的性質を明らかにする必要がある。磁氣的な励起構造を調べる実験として、中性子散乱実験がある。中性子散乱スペクトルは動的帯磁率と結びついている。

本研究では CuO_2 面の電子状態を反映したタイトバインディングモデルにおける飛び移り積分や、電子数密度を変化させて動的帯磁率を調べることを目的とする。乱雑位相近似を用いた数値計算の結果、帯磁率は反強磁性ベクトル Q に対応する波数の成分が成長し、反強磁性揺らぎが大きくなることが分かった。また、同一格子点上 Coulomb 斥力エネルギー U や電子数密度 n を変化させた時の、動的帯磁率の虚部における磁気共鳴ピークの変化を解析し、反強磁性揺らぎがどのように成長するかを調べた。その結果、電子ドープ系では、反強磁性揺らぎが弱くなることが分かった。

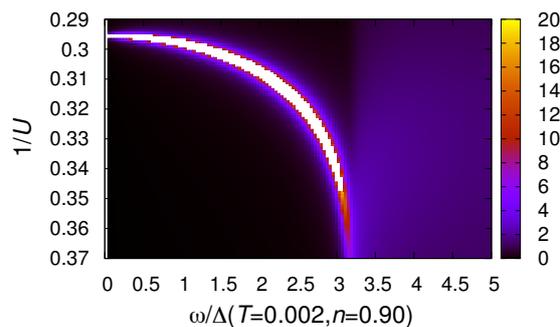


図 1: ホールドープ ($n = 0.90$) における動的帯磁率の ω 及び U 依存性

グラス転移を示唆する正方晶希土類化合物 R_2MgSi_2 ($R=Gd, Tb$)

埼玉大院理工^A, 埼玉大研究機構^B

沼倉凌介^A, 小坂昌史^A, 道村真司^{A,B}, 片野進^A

The spin glass like behavior of tetragonal R_2MgSi_2 ($R=Gd, Tb$)

^AGraduate School of Science and Engineering, Saitama Univ.,

^BResearch and Development Bureau, Saitama Univ.

R.Numakura^A, M.Kosaka^A, S.Michimura^{A,B} and S.Katano^A

Keywords: 希土類化合物、試料作成、Griffiths 相

希土類化合物 R_2MgSi_2 は空間群 $P4/bmb$ に属する正方晶化合物であり、 Mo_2FeB_2 型の結晶構造をもつ物質である[1]。 $R=Gd-Lu$ について Mg を用いた自己フラックス法によって単相試料の作成に成功している。 $R=Gd, Tb$ の物性の報告はこれまでになく今回が初めてとなる。帯磁率の温度変化から、 Gd_2MgSi_2 及び、 Tb_2MgSi_2 はそれぞれ $T_N=29K, 46K$ において反強磁性転移を示すカuspを観測した。また電気抵抗及び比熱測定においても T_N で反強磁性秩序に伴う異常を観測している。また帯磁率の温度変化ではそれぞれ $T^*=190K, 140K$ 近傍以下でキュリー・ワイス則から大きく外れる帯磁率の急激な上昇が観測されている(図 1,2)。電気抵抗率、比熱の測定においては T^* 近傍における異常は見られない。この帯磁率の上昇は磁場の印加に伴い徐々に抑制されていき $H=30kOe$ の磁場下ではほぼキュリー・ワイス則に従うパラ常磁性の振舞いとなる。現在のところ、 T^* 以下から Griffiths 相のようなクラスターグラスの発達が起きている可能性を考えている。ZFC, FC 測定において T^* 以下から大きな温度ヒステリシスをもつことからクラスター間で強磁性的な相関が働いていると考えている。また Gd_2MgSi_2, Tb_2MgSi_2 では単結晶試料の育成に至っていないため、多結晶試料による磁場配向試料を作成し磁気異方性を調べた。X線回折実験の結果から配向方向が c 面内方向であることが分かった。当日は Gd_2MgSi_2 及び Tb_2MgSi_2 の磁気異方性も含め議論する。

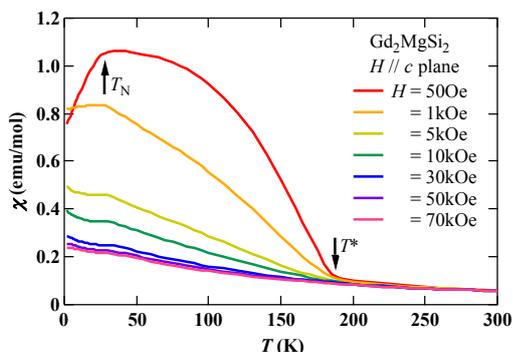


図 1: Gd_2MgSi_2 帯磁率の磁場依存性

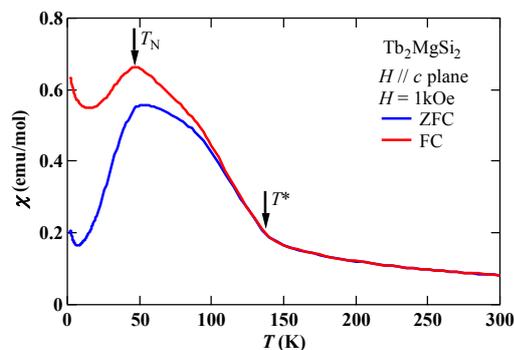


図 2: Tb_2MgSi_2 帯磁率の温度ヒステリシス

[1] R.Kraft and R.Pottgen, Monatsh. Cjem. 136(2005)1707.

PS- 25

局所的な空間反転対称性が破れた系における超伝導

京都大学大学院理学研究科

角田 峻太郎

Superconductivity in Locally Noncentrosymmetric Systems
Graduate School of Science, Kyoto University
Shuntaro Sumita

Keywords : 局所的な空間反転対称性の破れ, 反対称スピン軌道相互作用, FFLO 超伝導

多くの先行研究で, 大域的な空間反転対称性が破れた系 (金属, 半導体, 絶縁体) について調べられてきた. この系に特有な相互作用として反対称スピン軌道相互作用があり, 空間反転対称性の欠如はこの相互作用を通して物性に影響を与えている. これに関連して近年の研究では, 大域的な空間反転対称性はあるが局所的な空間反転対称性が破れた系について注目が集まっている. 大域的に空間反転対称性が破れた系では (ラッシュバ型のような) 一様な反対称スピン軌道相互作用が主要な役割を果たしているが, 局所的に空間反転対称性が破れた系では staggered な反対称スピン軌道相互作用が存在する.

局所的には空間反転対称性がない系として, 特にジグザグチェーン構造に注目すると分かりやすい (図 1). この系では 2 つの副格子が互いに逆向きの磁気モーメントを持つ「反強磁性状態」になる可能性がある. このことと, 上に述べた反対称スピン軌道相互作用によってフェルミ面が分裂していることからフェルミ面が非対称に変形し, Cooper 対が有限の重心運動量を持って凝縮する FFLO 状態¹ が実現しうる. FFLO 状態は普通は外部磁場下にある超伝導体において安定な状態として知られているが, このジグザグチェーンでは外部磁場をかけずとも内部磁場によって FFLO 状態が実現するものと考えられる. 本研究ではこのジグザグチェーンの反強磁性状態における超伝導を考察し, FFLO 状態が実現しうることを見たい. また, その他進展があった場合にはその内容についても議論する予定である.

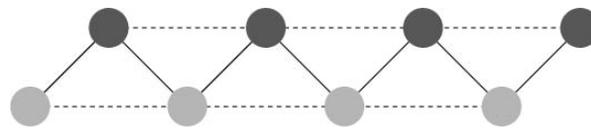


図 1: 1次元ジグザグチェーンの結晶構造. 色の違う丸がそれぞれ副格子になっている.

参考文献

- [1] Y. Yanase, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 014703 (2014)

¹Flude と Ferrell, Larkin と Ovchinnikov がそれぞれ独立に提案した超伝導状態であるので, 4人の頭文字を取って FFLO という.

PS- 26

磁場中超伝導状態への多バンド性・Pauli 常磁性の効果

京大院理
足立景亮, 池田隆介

The effect of multibandness and Pauli paramagnetism
on superconductivity under magnetic fields
Dept. of Phys., Kyoto Univ.
Kyosuke Adachi and Ryusuke Ikeda

Keywords : 多バンド系, FFLO 超伝導

近年注目を浴びている鉄系超伝導体では, 上部臨界磁場 $H_{c2}(T)$ (超伝導揺らぎを無視した範囲で超伝導が完全に破壊される磁場の強さ) の測定などから, Pauli 常磁性に起因した Cooper 対破壊 (PPB) や多バンド性 (Fermi 面が複数のバンドから構成されていることに由来する性質) が磁場下の超伝導状態に影響していることが推測されている. PPB が強い系では, 高磁場下において通常の渦糸格子状態 (超伝導秩序変数 $\Delta(\mathbf{r})$ のゼロ点及び量子化された磁束が格子状に並んだ状態) が不安定になり, Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 状態と呼ばれる特殊な超伝導状態 [1] が出現すると考えられている. FFLO 状態は, 渦糸に由来する $\Delta(\mathbf{r})$ の空間変化のほかに, PPB に起因した空間変調を含み, 空間並進対称性が自発的に破れた超伝導状態である. また, ミクロな観点から見れば, 有限の重心運動量をもった Cooper 対が存在することに対応する. ところで FeSe では, 最近の熱伝導測定の結果 [2] から, c 軸に平行な高磁場下において, 通常の渦糸状態とは異なった超伝導状態の存在が示唆された. この状態は, PPB や多バンド性が鍵となって引き起こされた, FFLO 状態のように空間変調を伴う超伝導状態に対応している可能性がある. このような背景から, PPB と多バンド性が高磁場下の超伝導状態にもたらす影響を理論的に調べるのが重要だと考えられる.

そこで, 本研究 [3] では FeSe を念頭に置いて, c 軸に平行な磁場下での超伝導転移の特徴を調べた. 出発点としては 2 バンド BCS モデルを採用し, バンド間相互作用を含めることで多バンド性を考慮した. 続いて Ginzburg-Landau 自由エネルギーを導出し, 変調を含む状態への転移の可能性を考慮した上で, $H_{c2}(T)$ での転移の特徴や, $H_{c2}(T)$ 近傍での秩序変数 $\Delta(\mathbf{r})$ の空間変化を調べ, 次のような結果を得た. まず両方のバンドで PPB が弱い場合には, 各バンドでの Fermi 速度の違いに起因して $H_{c2}(T)$ 曲線は非単調にふるまう. 次に片方のバンドで PPB が強い場合に注目すると, 高磁場下での超伝導転移は一次転移となる傾向にある. このとき, 高磁場下での超伝導状態は, crisscrossing lattice [4] と呼ばれる, 特殊な変調状態に対応しうることがわかった. これらの結果は, バンド間相互作用に由来していることがわかり, そのため 2 バンド系特有の性質であると結論した. 本講演では, 用いた手法や得られた結果について詳しく説明する予定である.

- [1] Y. Matsuda and H. Shimahara, J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 051005 (2007).
- [2] S. Kasahara *et al.*, Proc. Nat. Acad. Sci. USA **111**, 16309 (2014).
- [3] K. Adachi and R. Ikeda, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 064712 (2015).
- [4] D.F. Agterberg *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 017001 (2008).

量子スピナイス $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ における磁気単極子の熱伝導京大院理^A寺澤大樹^AThermal conductivity of monopoles in the quantum spin ice material $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ^A*Dept. of Phys., Kyoto Univ.,*D. Terazawa^A,

Keywords: スピナイス、磁気単極子、熱伝導

近年、幾何学的フラストレーションが引き起こす様々な興味深い現象が研究されている。その中でも、パイロクロア型希土類酸化物 $\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ や $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ は、基底状態がマクロに縮退した古典スピナイス状態となり、その素励起は分散のない古典的磁気単極子として議論されている。一方 $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ では、 Yb^{3+} の磁気モーメントの相互作用がイジング成分 $J_{zz} = 2 \text{ K}$ のみでなく、XY 成分 $J_{xy} = 0.58 \text{ K}$ や非対角項 $J_{zx} = 1.7 \text{ K}$ も含む[1]ことが報告されている。これより $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ は前述の二つの古典スピナイスにくらべ、量子揺らぎの影響が大きいことがわかる。この系は $T_c = 0.2 \text{ K}$ で強磁性状態へ一次転移するが、常磁性状態ではスピナイスの相関を持つことが知られており[2]、量子スピナイス状態を研究する上で有用であると考えられる。

今回我々は $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の素励起の性質を調べるため、熱伝導率の磁場依存性を測定した。その結果、スピナイス相関が現れる 4 K 以下の温度において、熱伝導率が低磁場で減少する非単調な振舞いがみられた。これは磁場により磁気単極子数が減少したからであると予想される。それを確かめるため、 $\kappa(H) = \kappa(0) - \alpha H^2$ でフィッティングを行い α の温度依存性を調べると、 α は強磁性転移温度である $T_c = 0.2 \text{ K}$ 付近で0から急激に立ち上がり、 $T_{\max} = 0.4 \text{ K}$ 付近でピークを持って減少した。強磁性相においては磁気単極子が存在できないため、 T_c 以下では磁気単極子の熱伝導率への寄与が消失することが予想される。したがってこの T_c からの α の急激な立ち上がりは、低磁場での $\kappa(H)$ の減少が磁気単極子によるものであることを示している。また α がピークを見せる温度は磁気単極子の励起エネルギーと関係があると考えられるが、その温度は $T_{\max} = 0.4 \text{ K} < 2J_{zz} = 4 \text{ K}$ と古典磁気単極子の励起エネルギーに比べ、大幅に小さくなっている。この励起エネルギーの大幅な抑制は、量子揺らぎの効果によりこの系において磁気単極子が分散を持つ「量子磁気単極子」になっていることを示唆している。当日は磁場方向の依存性なども合わせ、これらの結果を詳しく述べる。

[1] K. A. Ross *et al.*, Phys. Rev. X **1**, 021002 (2011).[2] L. J. Chang *et al.*, Nat. Comm. **3**, 992 (2012)

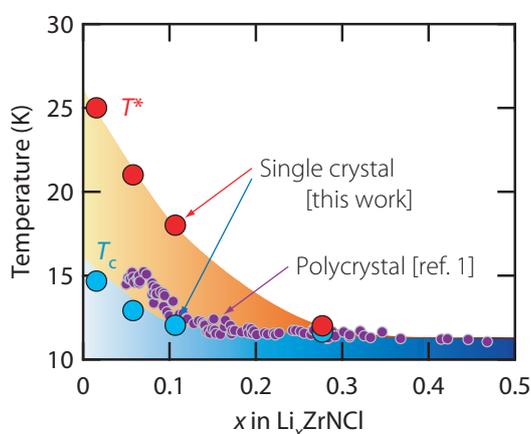
イオンゲート法による Li_xZrNCl 単結晶の電気伝導と超伝導東大院工^A, 京大理^B, 理研 CEMS^C中川 裕治^A, 斎藤 優^A, 張 奕勁^A, 石 武^A, 笠原 裕一^B, 岩佐 義宏^{A, C}Electrical transport and superconductivity in Li_xZrNCl single crystal by ionic-gating^ADept. of Appl. Phys. Univ. of Tokyo, ^BDept. of Phys. Kyoto Univ.,
^CRIKEN CEMSY. Nakagawa^A, Y. Saito^A, Y. J. Zhang^A, W. Shi^A, Y. Kasahara^B, Y. Iwasa^{A, C}

Keywords : 超伝導, 層状物質, インターカレーション

層状窒化物 ZrNCl は、アルカリ金属をはじめ様々な金属原子をインターカレーション（層間挿入）することで転移温度 11 K から 15 K 程度の超伝導体になることが知られている。特に Li_xZrNCl のドーピング量 x に対する転移温度依存性は Taguchi らによって詳細に調べられており、ドーピング量を減らしていくとある領域から転移温度が急激に上昇し、後に突如絶縁化することが示されている [1]。このような Li_xZrNCl 超伝導体の非 BCS 的振る舞いを説明する様々な超伝導機構が提唱されているが、実験はこれまで多結晶体に限られており、より理想的な系での超伝導パラメータの測定が求められていた。

そこで本研究では、近年新たに発案された iFET (ionic-gated Field Effect Transistor) の技術 [2] を用いて ZrNCl 単結晶にリチウムをインターカレーションすることを試み、その場での電気伝導性測定を行い、超伝導の観測に成功した。ゲート電圧によりドーピング量を制御することができ、転移温度のドーピング量依存性は多結晶体での結果に一致する。一方で、超伝導臨界磁場の角度依存性の測定により、多結晶で報告された値を大きく上回る異方性を持つ超伝導体であることが示された。また、転移温度の上昇に伴い、臨界磁場は通常の転移温度から予想される値よりも大きく上昇し、超伝導揺らぎ領域は拡大した。

ポスター講演では単結晶で得られたこれらのデータをもとに、この超伝導の起源について考察する [3]。



図：ドーピング量に対する転移温度

[1] Y. Taguchi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 107001 (2006)[2] Y. Yu *et al.*, *Nature Nanotech.* **10**, 270 (2015)[3] Y. Nakagawa *et al.*, in preparation

低密度アルカリ金属液体におけるプラズモン励起観測

京大院理^A, NSRRC/SPring-8^B, 広大院総合科^C
 萩谷透^A, 木村耕治^A, 松田和博^A, 平岡望^B, 宮武至^A,
 石黒陽太郎^A, 梶原行夫^C, 乾雅祝^C, 八尾誠^A

Plasmons in low-density liquid Rb

^AKyoto Univ.dept.Phys, ^BNSRRC/SPring-8, ^CHiroshima Univ.

T. Hagiya^A, K. Kimura^A, K. Matsuda^A, N. Hiraoka^B, T. Miyatake^A,
 Y. Ishiguro^A, Y.Kajihara^C, M. Inui^C, M. Yao^A

Keywords: 不規則系, 電子状態, 非弾性 X 線散乱, 放射光

アルカリ金属液体の温度を上げて、膨張させることにより、伝導電子密度の低い状態を実現することができる。そのような低密度状態においては、電子間相互作用が支配的になり、電子系の圧縮率が負に転じるという理論予測が、電子ガスモデルによってなされている[1]。圧縮率が負であるという熱力学的に不安定な状態において、現実の物質中における電子間相互作用が、どのように変化するかということは、いまだ解決されていない。

そのような低密度状態での電子状態を知るうえで、プラズモン挙動を調べることは有用である。プラズモンとは電子の集団励起であり、その励起エネルギーの分散関係から、電子間の有効的な相互作用に関する情報を得ることができる。本研究では、低密度化した金属における電子間相互作用の知見を得ることを目的とし、高温領域におけるアルカリ金属液体 Rb のプラズモン励起スペクトルを測定した。

高温領域でのプラズモン観測を可能とするため、高压容器を使用し、SPring-8 の BL12XU において放射光を用いた非弾性 X 線散乱実験を行った。本研究により初めて高温領域における(5MPa, 300, 500, 800°C)液体金属のプラズモン励起スペクトルを測定することに成功した。右図はその分散関係である。温度上昇に伴い、励起エネルギーが低下する挙動を示した。これは、膨張による密度低下を反映したものと考えられる。本発表では分散関係の詳細について報告する。

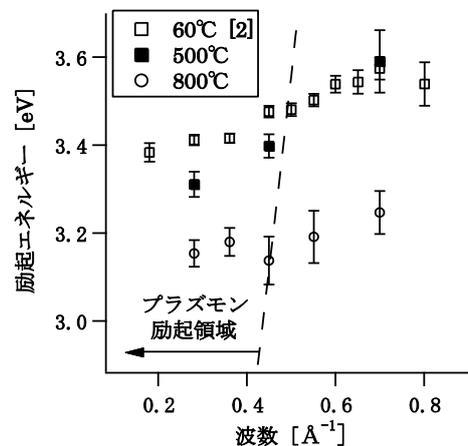


図 液体 Rb におけるプラズモン分散の温度依存性。60°C のデータは[2]。

[1] G. F. Giuliani, G. Vignale, *Quantum Theory of the Electron Liquid* (Cambridge Univ. Press, New York, 2005).

[2] K. Kimura, K. Matsuda, N. Hiraoka et al. Phys. Rev. B. **89**, 014206 (2014).

超低温下におけるドハース・ファンアルフェン効果の測定

東大物性研

山田章悟

Measurements of the de Haas–van Alphen effect at ultra-low temperature

Institute of Solid State Physics, University of Tokyo

S. Yamada

Keywords: 超低温, 重い電子系, dHvA 効果

低温において自由電子に比べて 100 ~ 1000 倍の有効質量 m^* を持ついわゆる重い電子系物質は多様な量子相を示すことが知られている。これらの相への転移温度が圧力や磁場などのパラメータによって抑制され、絶対零度で相転移が起きる場合その転移点を量子臨界点と呼ぶ。この近傍では量子揺らぎによる m^* の発散などの特異な現象が現れるため、とりわけ盛んに研究が進められている。重い電子系物質の一つである YbRh_2Si_2 は 1 T 以下の低磁場領域に量子臨界点を持つことが報告されているものの[1] (図 1)、 m^* は 8 ~ 16 T の高磁場領域でのみ見積もられており[2]、量子臨界点近傍での m^* の発散はいまだ観測されていない。

磁場中の電子はランダウ準位と呼ばれるとびとびのエネルギー準位をとるが、磁場 H を強めていくと準位間の間隔が広がっていき、一番外側の準位がフェルミエネルギーを超えると、その準位にいた電子は下の準位に入り込む(図 2)。さらに磁場を強めていくとこの過程が繰り返され、全体のエネルギーは H の変化に対して振動する。この現象はドハース・ファンアルフェン(dHvA)効果と呼ばれ、振動を測定することによって m^* の大きさやフェルミ面の形状を推定できる。dHvA 効果検出の条件は、準位間の間隔 $\Delta E (\propto H)$ が温度による準位のぼけ $k_B T$ よりも大きいことである。すなわち、より低い温度領域で実験を行えば、低磁場下における dHvA 効果の測定が可能となる。そこで我々は、上述したような重い電子系物質の量子臨界点近傍における m^* の大きさやより詳細なフェルミ面の性質を明らかにするため、核断熱消磁法を用いて数 mK の超低温まで冷却可能な dHvA 効果測定装置の開発を進めている。

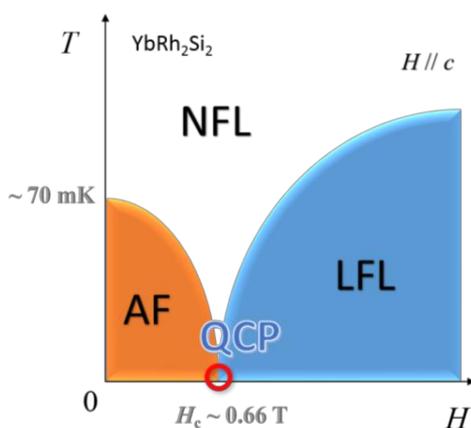
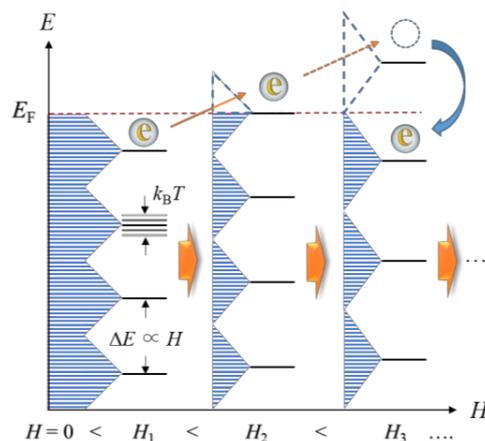
図 1. YbRh_2Si_2 の磁場・温度相図.

図 2. dHvA 効果の概念図.

[1] O. Trovarelli *et al.*, Phys. Rev. Lett. **85**, 626 (2000).[2] P. M. C. Rourke *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 237205 (2008).

熱伝導率測定を用いたフラストレート磁性体の研究

所属 東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 物質系専攻

発表者 今井 悠介

Thermal-transport measurements in a frustrated magnet

Department The University of Tokyo

Name of presenter Yusuke Imai

Keywords : フラストレート磁性体, 量子スピン液体, 熱伝導率測定, frustrated magnet, quantum spin liquids, thermal-transport measurements

近年、フラストレート磁性体の中でも量子スピン液体と呼ばれる現象に関する研究が盛んにおこなわれている。この量子スピン液体状態とは量子揺らぎによりスピンの絶対零度まで長距離秩序を示さずに、バラバラの向きで秩序化しない状態である。特に2次元三角格子をもつ反強磁性体では幾何学的フラストレーションの効果もあるため非自明な状態になる。Figure 1のように、三角格子の頂点にある電子はどのように配置しても一つの電子がシングレットペアを組めずに余ってしまい、これを格子全体で考えると様々なシングレットペアが重ね合わされた状態となる。これは Resonating valence bond 状態 [1] と呼ばれており量子スピン液体状態の一つである。

一般に熱伝導は伝導電子とフォノンが担っているが量子スピン系は絶縁体である。しかし、量子スピン系ではスピンの励起により熱を運ぶことができる [2]。したがって、熱伝導率測定をおこなうことでスピン系の情報を得ることができる。

私の研究は希釈冷凍機を用いた極低温での熱伝導率測定を行うことにより、量子スピン液体状態を中心とした様々フラストレート磁性体についての素励起の解明や新たな物理現象を発見することを目指しています。当日の発表では現在測定しているものの測定結果も交えて発表する予定です。

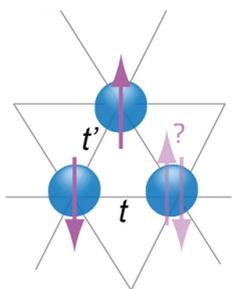


Figure 1: 2次元三角格子の幾何学的フラストレーション

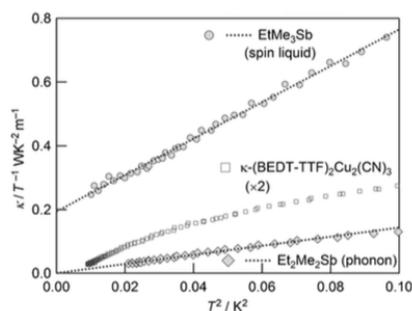


Figure 2: 量子スピン液体状態を実現している κ -(BEDT-TTF)₂Cu₂(CN)₃、EtMe₃Sb[Pd(dmit)₂]₂ と EtMe₃Sb[Pd(dmit)₂]₂ (スピン液体) と似た構造をもつ Et₂Me₂Sb[Pd(dmit)₂]₂ (非磁性体) の熱伝導率 [3]

[1] P.W. Anderson, Mater. Rev. Bull. 8 153 (1973)

[2] M. Yamashita *et al.*, Science 328, 1246-1248 (2010)

[3] M. Yamashita *et al.*, ChemPhysChem 13, 74-78 (2012)

超流動 ^4He 中での coflow における量子乱流

阪市大理 ^A, 阪市大複合先端研 ^B
井川真一 ^A, 坪田誠 ^{A,B}

Quantum turbulence in coflow of superfluid ^4He

^ADept. of Phys., Osaka City Univ., ^BOCARINA, Osaka City Univ.

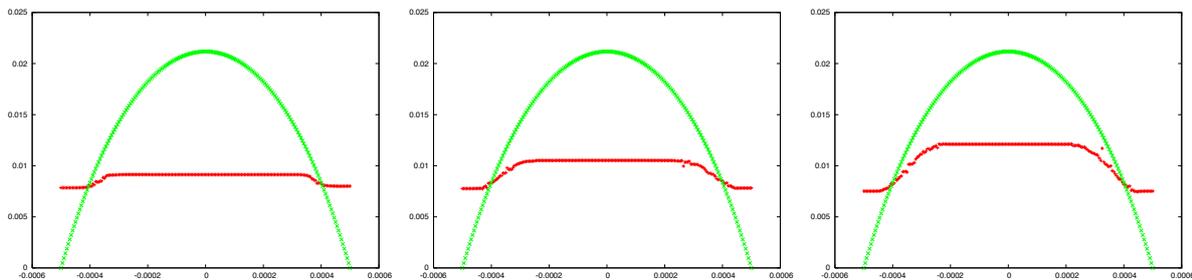
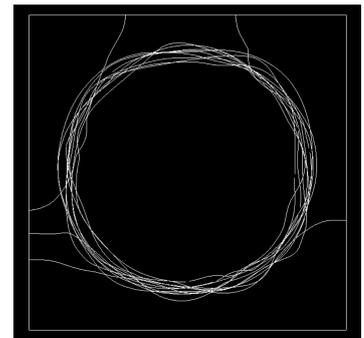
Shinichi Ikawa^A and Makoto Tsubota^{A,B}

Keywords: 渦、超流動、量子乱流

本発表では、超流動 ^4He の coflow (超流動速度場と常流動速度場を同方向に流す) において生じる非一様な量子乱流について講演する。主な研究手法は渦糸モデルを用いた数値シミュレーションである。

1950年代後半、W.F.Vinen が熱対向流によって量子乱流の観測を行った。[1]その後、1980年代後半に K.W.Schwarz が数値計算によって量子渦糸のダイナミクスから量子乱流が出来ることを証明した。[2]これ以降も熱対向流の理論、実験が数多く行われてきた。そして近年、coflow という新たな状況での実験が行われるようになり、熱対向流とは異なる特徴を示すことが観測された。[3]

coflow の数値シミュレーションの結果、量子渦が右図のように空間的に偏って分布することを発見した。つまり、3次元量子乱流が2次元量子乱流へと縮退していることが分かった。またこの縮退を引き起こすかどうかを決める臨界速度が存在するであろうと示唆する結果を得た。最後に2次元量子乱流に縮退したとき、超流動速度場が常流動速度場に一致してくる。このことを示す先行研究[4]での問題点を解決し、同様の結果を得た。



緑線：常流動速度場、赤線：超流動速度場、図は左から $t=5.0, 20, 30\text{s}$ の時のものである。

[1]W.F.Vinen: Proc. Roy. Soc. A 240 (1957) 114. etc..

[2] K.W.Schwarz, Phys. Rev. B 38, 2398 (1988).

[3]E.Varga, S.Babuin, and L.Skrbek, Physics of Fluids 27, 065101 (2015).

[4]D.C.Samuels, Phys. Rev. B 46, 714 (1992).

光子偏光-電子スピン間量子もつれ相関の生成に向けた

光子-電子の同時検出実験

東大工^A, *Lehrstuhl für Angewandte Festkörperphysik Ruhr-Univ. Bochum*^B,
 阪大産研^C, 理研 CEMSP^D

黒山和幸^A, Marcus Larsson, 藤田高史, 松尾貞茂, Sascha R. Valentin,
 Arne Ludwig, Andreas Wieck, 大岩顕, 樽茶清悟^B

Simultaneous detection of a photon and an electron towards quantum
 entanglement generation between a photon polarization and an electron spin

^A*Department of Applied Physics, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan,*

^B*Lehrstuhl für Angewandte Festkörperphysik Ruhr-Univ. Bochum,*

^C*The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, Ibaraki,
 Osaka, Japan*

^D*Center for Emergent Materials Science, RIKEN, Wako, Saitama, Japan*

K. Kuroyama^A, M. Larsson^A, T. Fujita^A, S. Matsuo^A, S. R. Valentin^B, A. Ludwig^B,
A. Wieck^B, A. Oiwa^C and S. Tarucha^{A, D}

Keywords: 半導体, 量子ドット, 光物性

光-固体インターフェースを基盤とした量子情報ネットワークの構築には、光のコヒーレンス長の有限性から量子中継器が必要とされる。現在、GaAs 系半導体量子ドットでの量子状態転写¹を用いた量子中継器の実現へ向けて、光子対の持つ偏光の量子もつれ相関を空間的に離れた電子スピン対へ移す研究が進められており、光子偏光-電子スピン間に量子もつれ相関を生成することが直近の課題である。

我々は、自発パラメトリック下方変換(SPDC)により同時発生した光子対を観測し、その一方をGaAs系量子ドットに照射する光学系を構築した。また、本研究では光子-電子変換効率の高い量子ドットデバイスが必要であるため、分布ブラッグ反射器共振器構造とソリッドイメージョンレンズを導入した横型二重量子ドットデバイスの作製を行った。光子-電子の同時検出へ向けた実験系の構築の進捗について報告する。

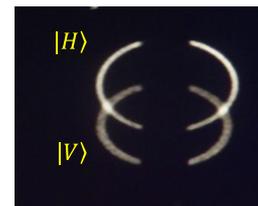


図. 1 SPDC の観察像

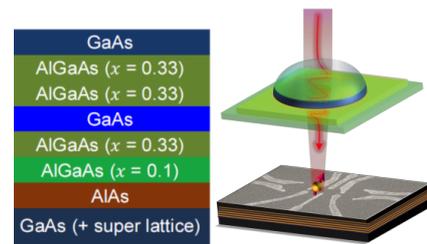


図. 2 基板の層構造 (左図) と光子照射実験の概念図(右図)

[1] R. Vrijen and E. Yablonovitch, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* **10**, (2001) 569.

PS- 34

トポロジカル量子臨界点近傍におけるアクシオン電磁気学の理論

名大工^A, 東大工^B, 京大基研^C

今枝立至^A, 川口由紀^B, 田仲由喜夫^A, 佐藤昌利^C

Axion electrodynamics near topological quantum phase transition

Dept. Applied Physics, Nagoya Univ.^A, Dept. Applied Physics, Univ. of Tokyo^B, YITP, Kyoto Univ.^C

Tatsushi Imaeda^A Yuki Kawaguchi^B Yukio Tanaka^A and Masatoshi Sato^C

Keywords : トポロジカル絶縁体, アクシオン電磁気学

通常、電磁気学は次のようなラグランジアン密度

$$\mathcal{L}_{\text{Maxwell}} = \frac{1}{8\pi}(\vec{E}^2 - \vec{B}^2) - A_\mu j^\mu \quad (1)$$

(\vec{E} : 電場, \vec{B} : 磁場, A_μ : 4元ベクトルポテンシャル, j^μ : 4元カレント, ($\mu = 0, 1, 2, 3$)) によって記述され、実際、このときオイラー・ラグランジュ方程式からマクスウェル方程式が得られる [1]。一方、式 (1) にいわゆる θ 項と呼ばれるラグランジアン

$$\mathcal{L}_\theta = \frac{\alpha}{4\pi^2} \theta \vec{E} \cdot \vec{B} \quad (2)$$

($\alpha \simeq \frac{1}{137}$: 微細構造定数、 θ は座標 \mathbf{x} と時間 t に依らない定数) を付け加えても一般には運動方程式に影響がないことが知られている。

ところが式 (2) において θ が (\mathbf{x}, t) に依る場合には、マクスウェル方程式は修正を受け [2]。具体的には静電場と静磁場との間の交差相関があるというのが特徴である。このとき $\theta(\mathbf{x}, t)$ はアクシオン場と呼ばれ、その電磁気学は特にアクシオン電磁気学と呼ばれている。その際、現れる新粒子、アクシオンは初め素粒子物理の世界で今から 30 年以上も前に予言され [3]、その後ダークマターの候補ともされたが、未だ有力な証拠となる観測はされていなかった。近年、トポロジカル絶縁体の発見され、通常の絶縁体が $\theta = 0$ に対し、トポロジカル絶縁体では有効的に $\theta = \pm\pi$ の値をとることが理論的に予言され注目されるようになった [4]-[5]。

そこで、私はトポロジカル物質を使ってアクシオン電気磁気効果を観測するために必要な条件とその際起こる現象についての研究を行った。本発表では、アクシオン電磁気の導入部分から、本研究について紹介する。

[1] ランダウ, リフシッツ (著), 恒藤 敏彦, 広重 徹 (訳) (1978): 『場の古典論—電気力学, 特殊および一般相対性理論 (ランダウ=リフシッツ理論物理学教程)』 (東京図書)

[2] Frank Wilczek, Phys. Rev. L **58**, 1799 (1987)

[3] R. D. Peccei and H. R. Quinn, Phys. Rev. L **38**, 1440 (1977)

[4] X. L. Qi *et al.*, Phys. Rev. B **78**, 195424 (2008)

[5] H. Ooguri, and M. Oshikawa, Phys. Rev. L **108**, 161803 (2012)

メソスコピック系におけるスピングラスの雑音測定

^A 大阪大学大学院理学研究科物理学専攻^B 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

谷口 祐紀^A, 前田 正博^A, 竹下 俊平^A, 真木まゆみ^B, 山岸 航大^B,
 荒川 智紀^A, 谷口 年史^B, 新見 康洋^A, 小林 研介^A

Noise measurements of spin-glass in mesoscopic systems

^ADepartment of Physics, Graduate School of Science, Osaka University^BDepartment of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka UniversityH. Taniguchi^A, M. Maeda^A, S. Takeshita^A, M. Maki^B, K. Yamagishi^B,T. Arakawa^A, T. Taniguchi^B, Y. Niimi^A, K. Kobayashi^A**Keywords:** スピングラス, メソスコピック, 雑音

スピングラスとは、母体となる非磁性体金属に磁性不純物がランダムに分布している系で実現する状態で、単純な強磁性体や反強磁性体秩序は現れず、これらが複雑に絡まってガラスのような転移をすることから名付けられている (図 1(a))。その本質は磁性不純物間に働く RKKY 相互作用であり、1970 年代から研究されている現象であるが、系のランダムさ故に、その全容は現在に至るまで解明されていない。

これまでの研究は主に、バルクのスピングラス物質を用いた磁化測定で行われてきた[1]。図 1(b)に示すように、磁化率は特徴的なカusp構造を有し、カuspの温度 (スピングラス温度 T_g) 以下では、磁性不純物の磁気モーメントがランダムに凍結していると考えられている。しかし、どのような過程を経て、磁気モーメントが凍結するのか、特にスピングラス相でのスピンゆらぎに関する研究はあまり進んでいない。

そこで本研究では、スピンのゆらぎに起因する効果を調べるために、スピングラス系で生じる雑音を測定した。精密な雑音測定は、伝導電子スピンを介した磁性不純物スピン間のダイナミクスを定量的に評価できるプローブとなり得る[2]。本講演ではその測定系を説明した後に、最近得られた結果について議論する。

[1] S. Nagata *et al.*, PRB **19**, 1633 (1979). [2] N. Israeloff *et al.*, PRL. **63**, 794 (1989).

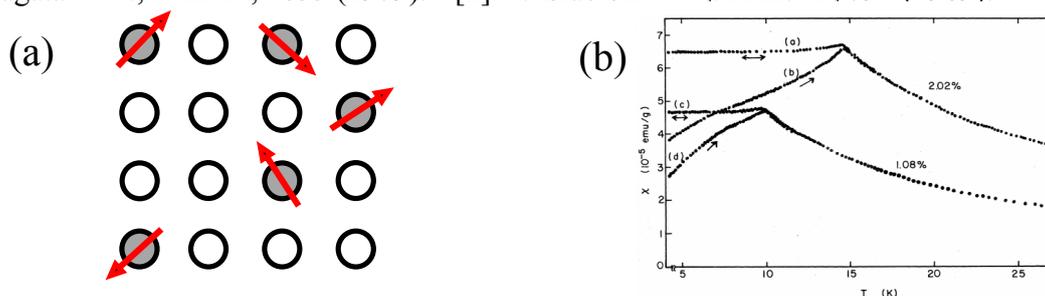


図 1: (a)スピングラスの模式図。白丸が非磁性金属、黒丸が磁性不純物、磁性不純物スピン(矢印)はランダムな方向を向いている。(b)典型的なスピングラス物質 CuMn の磁化率の履歴現象[1]。

磁場中のカーボンナノチューブ量子ドットにおける近藤効果

大阪市大理

寺谷 義道, 小栗 章

**Kondo effect in a carbon nanotube quantum dot
with a magnetic field**

Department of Physics, Osaka City University

Yoshimichi Teratani, Akira Oguri

Keywords : 近藤効果, 量子ドット, カーボンナノチューブ,
Kondo effect, Quantum dot, Carbon nanotube

本研究では、カーボンナノチューブ量子ドットに磁場を印加した場合の近藤効果を理論的に調べている。元来、近藤効果は希薄磁性合金における現象として観測されてきたが近年では量子ドットにおいても観測されている。近藤効果は希薄磁性合金では低温における電気抵抗の対数的増大として観測されるが、量子ドットでは電子のコンダクタンスの対数的増大として観測される事に特徴がある。近藤効果の出現は量子ドット中の電子準位が単一である場合が代表的であるが [1,2]、本研究の対象であるカーボンナノチューブ量子ドットはそのカイラル対称性によって二重に縮退した電子軌道を持っている。この縮退した軌道によって SU(4) 近藤効果が生じる。この SU(4) 近藤効果を調べる実験が現在大阪大学 理学研究科 小林 研介 研究室で行われていて [3]、所属研究室で行われている理論計算結果と整合性がとれている。そこで本研究ではこの系に磁場を印加した場合の近藤効果について理論計算を行っている。数値計算には Wilson 等によって確立された数値繰り込み群 (NRG) [4] を用いる。本研究では磁場が印加されたカーボンナノチューブ量子ドットに対応した NRG プログラムを新規に作成し、解析を進めている。本発表では、磁場が印加されている場合とされていない場合の量子ドットのコンダクタンス、電流ノイズやフェルミ液体パラメーター等の計算結果を提示し、量子ドットに対する磁場の効果について議論する。

[1] W. G. van der Wiel, et al, *Science* **289**, 2105 (2000)

[2] W. Izumida, O. Sakai, and S. Suzuki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **70**, 1045 (2001).

[3] T. Hata, T. Arakawa, R. Fujiwara, K. Kobayashi, M. Ferrier, *et al*,
日本物理学会秋季大会 8aAV-8, 8aAV-9 (中部大学, 2014)

[4] H. R. Krishna-murthy, J. W. Wilkins, and K. G. Wilson,
Phys. Rev. B **21**, 1003 (1980)

ワイル半金属におけるカイラル磁気効果

京都大学大学院 理学研究科
井辺 洋平

Keywords : トポロジカル相, ワイル半金属, カイラル磁気効果, 量子異常

トポロジカル系は、物質の新たな秩序相として、近年盛んに研究されている物質群である。その中で近年特に注目を浴びているカテゴリーとして、ワイル半金属がある。ワイル半金属は、グラフェンの3次元版とも言われ、バルクのバンド分散がディラックコーン形状をもつことが特徴である [1]。

最近の研究で、空間反転対称性の破れたワイル半金属において、「カイラル磁気効果」が発生することが、低エネルギー有効理論により提案された [2]。カイラル磁気効果とは、系に印加した磁場と平行に無散逸の電流が発生する、量子異常に起因する効果である [3]。しかしながら、一様磁場中ではこれが起こらないことが先行研究により示されていた [4]。我々はワイル半金属の具体的な格子モデルについて数値計算を行った結果、非一様磁場に対しては実際にカイラル磁気効果が現れることを明らかにした (図1)。

本ポスター発表では、ワイル半金属やカイラル磁気効果についてレビューを行い、最後に我々の最近の研究についてふれる予定である。

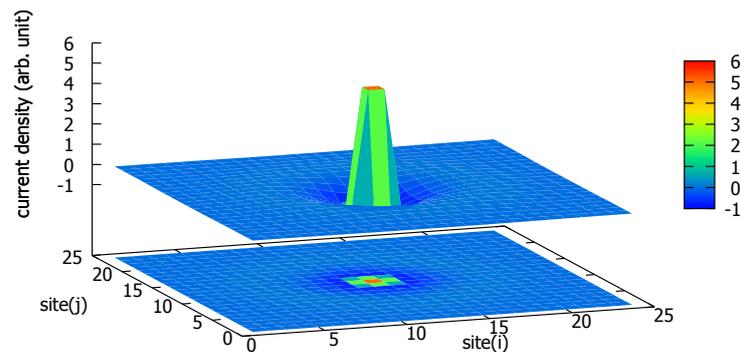


図 1: 3次元のワイル半金属に局所的 ($x = y = 0$) に磁場をかけた場合の電流密度の応答

- [1] X. Wan *et al.*, Phys. Rev. B **83**, 205101 (2011)
- [2] A. A. Zyuzin *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 115133 (2012)
- [3] K. Fukushima *et al.*, Phys. Rev. D **78**, 074033 (2008)
- [4] M. M. Vazifeh *et al.*, Phys. Rev. Lett. **111**, 027201 (2013)

MoSe₂ 発光トランジスタにおける巨大円偏光分極

東大院工^A, 理研 CEMS^B

恩河大^A, 張奕勁^A, 鈴木龍二^A, 岩佐義宏^{A,B}

Large circular polarization in MoSe₂ light-emitting transistor

^AUniv. of Tokyo, ^BCEMS RIKEN

Masaru Onga^A, Yijin Zhang^A, Ryuji Suzuki^A, Yoshihiro Iwasa^{A,B}

Keywords: 遷移金属カルコゲナイド、円偏光発光、バレー間散乱

遷移金属カルコゲナイド (Transition Metal Dichalcogenides, TMDs) は層状物質の一種で、その良好なトランジスタ特性と可視光範囲のバンドギャップゆえ半導体材料として有望視されてきた。更に、そのエネルギー的に縮退した非等価なフェルミポケット (バレー) を新しい自由度として扱うことによる“バレートロニクス”は近年注目を集めている。そのバレー自由度は円偏光とカップリングするため、その光学的側面の研究が興味深い。

本研究では TMDs の一種である MoSe₂ を用い、円偏光分極を電流注入発光 (Electroluminescence, EL) において実 (a) 現した。これは先に WSe₂ で報告された円偏光発光素子を MoSe₂ でも達成したものである[1]。さらにその分極率は 6 K において 66 %に達した[2]。

MoSe₂ は一方で、光誘起発光 (Photoluminescence, PL) においては円偏光発光が観測されない。これはバレー間散乱が強いためだと考えられている[4]。一方で今回、EL において巨大な円偏光分極を観測したことは、EL における円偏光分極機構がバレー間散乱に対し robust であることを示している。この結果は円偏光発光源としての本 EL 素子が、非常に有望であることを明確にしたものである[2]。

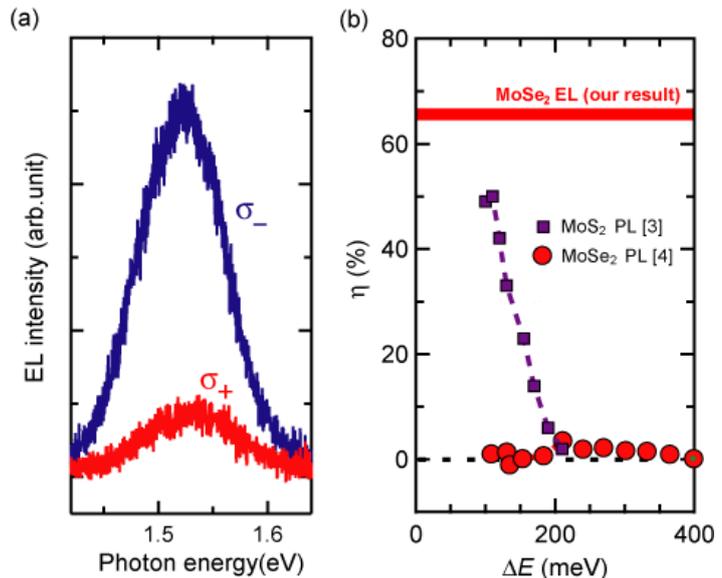


図: (a)円偏光分極 EL。(b)PL と EL の分極率の比較。 η は分極率、 ΔE は発光エネルギーと励起エネルギーの差。MoSe₂ は PL より EL が圧倒的に高い分極率を示す。比較として MoS₂ の PL のデータもプロットしている[2-4]。

[1] Y. J. Zhang, *et al.*, Science **344**, 725-728 (2014). [2] M. Onga, *et al.*, in preparation.

[3] D. Lagarde, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 047401 (2014).

[4] G. Wang, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **106**, 112101 (2015).

Ag プラズモン励起によるフェルミ海の波立ちを光で見る

東理大理^A, 成蹊大理工^B, トロント大^C高木健太郎^A, 渡邊良祐^B, 中田和明^A, 齋藤順平^A, Selva Nair^C, 徳永英司^A

Surface plasmon induced perturbation of Fermi surface in Ag probed by change in the interband optical transition spectra

Tokyo University of Science^A, Seikei University^B, University of Toronto^CK. Takagi^A, R. Watanabe^B, K. Nakata^A, Z. Saito^A, S. Nair^C, E. Tokunaga^A

Keyword: 表面, プラズモン, フェルミ面, 変調分光

近年、表面プラズモンの電場増強効果、表面環境に対する敏感な応答性を利用した様々な応用が進んでいる。そのような中、我々は表面プラズモンの基礎的な性質に興味を持ち、変調分光することで微弱な応答を検出した。

表面プラズモンが励起されたとき、プラズマ振動によって振動できるのはフェルミ面付近の電子のみなので、フェルミ面付近の電子分布が変化し、価電子帯からフェルミエネルギー付近の伝導帯への遷移強度に変化が起こるのであろう。このように考えて、プラズモン励起による反射率変化を測定したところ、バンド間遷移の信号に予想通りの変化を観測した。

本実験の光学系の一部を図1に示す。実験では、銀薄膜の空気-銀界面に表面プラズモンを励起し、銀のバンド間遷移付近(~320nm)の反射率変化を測定した。クレッチマン配置で波長408nmのレーザーにより表面プラズモンを励起、空気側から銀薄膜に白色光を入射し、反射光をマルチロックインアンプで変調分光した。図2に実験結果と反射の温度差分スペクトルを重ねて示す。ともに2次微分形でフィットできる反射率変化スペクトルを得た。グラフの特徴が異なることからプラズモン励起による反射率変化を温度上昇だけでは説明できない。

当日は、Ag 薄膜を面電流変調したときのバンド間遷移の変化についても報告する予定である。

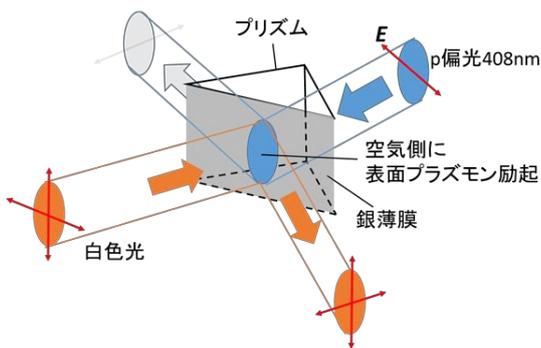


図1. 光学系

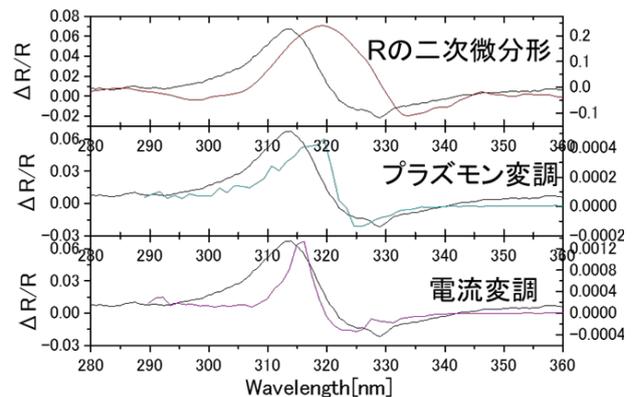


図2. 温度差分スペクトル(ΔT=50°C)との比較

多重軌道ハニカム格子におけるトポロジカル相

名大工^A, 京大基研^B

服部綾実^A, 佐藤昌利^B, 田仲由喜夫^A

Topological phases in multi-orbital honeycomb lattice
Dept. of App. Phys. Nagoya Univ.^A, YITP Kyoto Univ.^B
A. Hattori^A, M.Sato^B, and Y.Tanaka^A

Keywords : シリセン、ゲルマネン、スタネン、多軌道、エッジ状態

ハニカム格子を組んだシリセン、ゲルマネン、スタネンはグラフェンと類似した性質を持つ一方、結晶構造が sp^2 構造ではなく、 sp^3 構造へと若干変形した低バックル構造をとること、また、グラフェンよりもスピン軌道相互作用が大きいことから実験で可能な温度で量子スピンホール効果を実現できる可能性があり、新しいスピントロニクスデバイスの候補として期待されている。本研究では、シリセン、ゲルマネン、スタネンのエッジ状態を考察する。

これらの物質は同一平面上にない低バックル構造をとるため、 π 軌道だけでなく σ 軌道も低エネルギーの電子状態に影響するため、多軌道による電子物性が期待できる。このことから、本研究では s, px, py, pz の軌道を取り入れた多軌道タイトバインディングハミルトニアンを使って、エッジ状態の計算を行った。

結果はグラフェンでは1軌道タイトバインディングで計算した結果と同様なエッジ状態が得られたが、バックル構造を持つ物質では異なるエッジ状態が得られたため、本発表ではシリセン、ゲルマネン、スタネンはグラフェンとの構造の違いから多重軌道タイトバインディングでエッジ状態を考察する必要性について議論する。

[1] C.-C. Liu, *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 195430 (2011)

[2] Y.Xu, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **111**, 136804 (2013)

非集光レーザーによるポルフィリン分子の異常な会合変化

東京理科大学^A, 電通大先端レーザー研^B, CREST^C

白川正之^A, 鈴木雅也^A, 塩川直幸^A, 小林孝嘉^{B,C}, 徳永英司^A

^ATokyo University of Science, ^BUniversity of Electro-Communications, ^CCREST

M. Shirakawa^A, M. Suzuki^A, N. Shiokawa^A, T. Kobayashi^{B,C}, E. Tokunaga^A

Keywords: 光物性, 吸収分光, Optical Physics, Absorption Spectroscopy

有機分子の光誘起力については、過飽和状態の溶液にレーザーを照射し照射位置での結晶形成を促進させるといった先行研究があり発光スペクトル等による観測が行われてきた。今回我々の研究では飽和濃度以下の溶液に非共鳴、非集光のレーザーを照射し、レーザーの照射時間にのみ光誘起力が発生する分子凝縮体による吸収スペクトル変化の測定に成功した。図 1 は TPPS 水溶液の 532nm レーザー励起による B バンド、Q バンドの単量体、J 会合体の吸収スペクトル変化である。B バンドより低エネルギーの非共鳴レーザーの勾配力により、単量体の吸収減少と会合体の吸収増加が観測されていると解釈できる。注目すべきは、会合体領域の吸収増加が吸収スペクトルの会合体の吸収バンド幅より broad なことで、過渡的に異なる会合状態の会合体が生成している可能性があり、会合体の形成メカニズムの解明の観点から興味深い。また本研究では 408nm 等のレーザーを照射し 532nm と異なる吸収スペクトル変化を観測することができた。

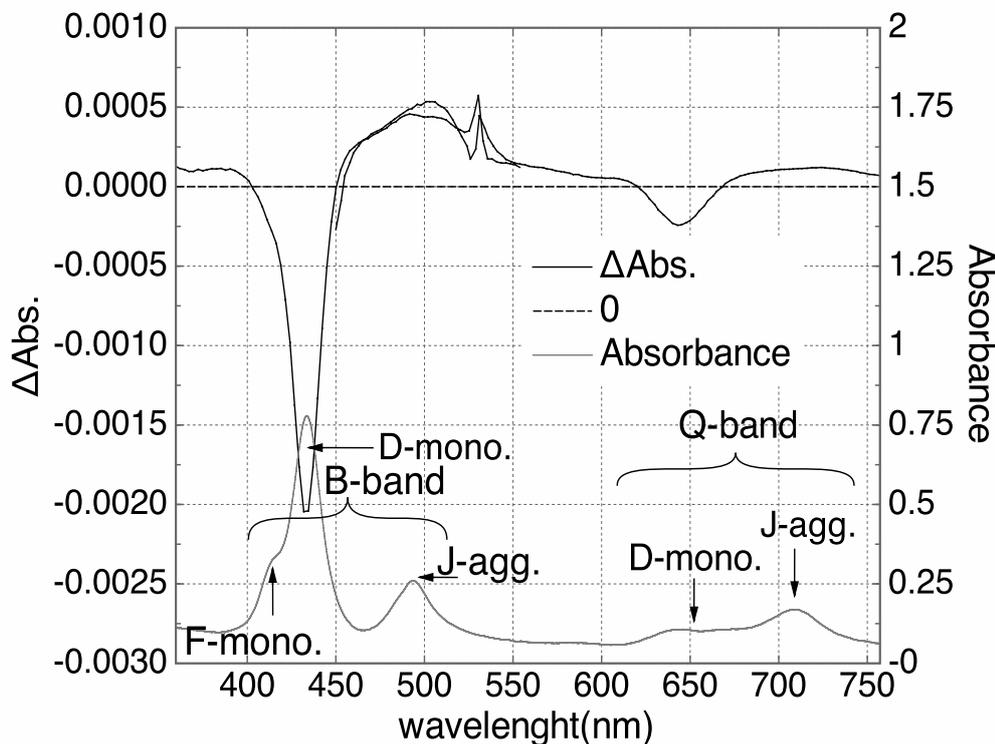


図 1.
TPPS 水溶液の 532nm レーザー励起による吸収スペクトル変化。単量体領域に吸収減少、会合体領域に吸収増加が見られる。

強束縛近似に対するバンドアンフォールディング

東京大学 工学系研究科 物理工学専攻

西 紘史, 松下 雄一郎, 押山 淳

Band unfolding of tight binding calculation

Department of Applied Physics, The University of Tokyo

Hirofumi Nishi, Yuuichiro Matsushita, Atsushi Oshiyama

Keywords : 半導体、不純物、強束縛近似、スーパーセル計算、バンドアンフォールディング

半導体を特徴付ける重要な物性値としてバンドギャップと有効質量がある。周期的なポテンシャルを持つ結晶においてエネルギーバンド図を簡易に求める手法の1つとして強束縛近似がある。これは波動関数を周期的なブロッホ関数で展開することと単位胞の構成原子の原子軌道の線形結合で電子状態を展開すること (LACO 近似) を用いる。原子軌道間の飛び移り積分をパラメータとして与えることによってハミルトニアンをつくり、対角化することによってエネルギーバンド図を得ることが出来る。強束縛近似から得られたエネルギーバンド図からはバンドギャップや有効質量、各バンドにおける軌道が占める割合など多く情報が得られる。簡易な方法であるため直感的に理解する事ができる。

キャリアドープを目的として不純物を加えるが、この不純物によりバンドギャップや有効質量が変わる。またこの不純物の割合によってエネルギーバンドがどのように変わるか決まる。複数の単位胞の中の一部の原子を置き換えることで不純物がドープされた割合を決めて結晶のバンド計算が行える。このように複数の単位胞についてエネルギーバンドを計算する手法をスーパーセル計算という。現在、半導体の不純物ドープや欠陥によりどのような影響があるかということの解明が課題である。波数空間は実空間の逆数であるためスーパーセルのブリルアンゾーンは単位胞のものより小さくなる。そのためスーパーセル計算ではバンドギャップを見積もることはできるが不純物の影響がエネルギーバンドの変化にどのように及んでいるか明らかでない。スーパーセルのエネルギーバンドを単位胞のバンドのものと対応させる事が出来ればエネルギーバンドにおいてどのような影響があるかわかる。それを対応付ける手法がバンドアンフォールディングである。これはスーパーセルのブリルアンゾーンに折りたたまれたエネルギーバンドを単位胞のブリルアンゾーンに戻すという操作である。

従来スーパーセル計算では密度汎関数理論 (DFT) に基づく計算が行われている。しかし強束縛近似による計算を行えば、原子軌道間の飛び移り積分がパラメータとして与えられているため直感的理解がしやすい。そのため本研究では強束縛近似を用いてスーパーセル計算とバンドアンフォールディングを行うことにより不純物によるエネルギーバンドの変化を考察する。

[1] D. J. Chadi and M. L. Cohen, *phys. stat. sol. (b)* **68**, 405 (1975), [2] T. B. Boykin and G. Klimeck, *Phys. Rev. B* **71**, 115215 (2005), [3] V. Popescu and A. Zunger, *Phys. Rev. B* **85**, 085201 (2012)

高強度広帯域テラヘルツ光を用いた強相関電子系の非線形分光

京都大学大学院理学研究科
岡広 駿

Keywords: THz 光、強相関電子系、非線形分光

強相関電子系とは電子間相互作用が大きく、電子の1体近似では解けない電子系のことである。強い電子間相互作用により電荷秩序、スピン秩序が自発的に形成することで知られている。有名な例として銅酸化物高温超伝導などがある。化学的なドーピングによりモット絶縁状態を解き、低温で超伝導を示すようになる。

近年、光によりこの秩序状態を制御しようとする試みがなされるようになってきた。高強度の光を照射することでこの秩序が融解し、相転移が引き起こされることが知られている（光誘起相転移）。つまり光を当てることで強磁性⇔常磁性、常流動⇔超流動、絶縁体⇔金属などの相転移を起こそうという試みである。例えば絶縁状態に光を照射することで自由キャリアを生成し、それらを用いて強相関物質の物性を制御することが期待されている。

THz 光とは周波数がテラ (10^{12}) ヘルツ帯にある電磁波であり、ちょうど電波と光波の中間領域の光である。この領域は他の周波数帯に比べ研究が遅れている分野であり、この未開拓なエネルギー領域の光を用いた強相関電子系の分光実験が本研究の目的である。

当日は研究概要の説明、進捗状況（本テーマでの研究は開始したばかりで現在、実験データはまだほとんどない）、将来的なプランを発表しようと考えている。

擬一次元量子スピン系 CuGeO₃ の THz 光誘起相転移

京都大学大学院理学研究科 光物性研究室 岡本 茜

Keywords : CuGeO₃, spin-Peierls, terahertz, photo-induced transition

銅酸化物絶縁体 CuGeO₃ は図1に示すような、斜方晶を単位格子とする結晶構造を持ち、すべての Cu サイトは結晶学的に等価である。CuGeO₃ では元素イオン Cu²⁺ がスピン ($s = 1/2$) を担い、スピン間の相互作用は Heisenberg 型である。最も強い c 軸方向に加えて b 軸方向に磁氣的結合を持つ、擬一次元反強磁性スピン系とみなせる。

スピン・パイエルズ転移 (以下、SP 転移) は格子点に局在したスピンが反強磁性的に結合した一次元スピン系において発現する可能性があり、このスピン系はスピン格子相互作用を介して三次元格子系と結合している。図2に示すように、転移温度 T_{SP} 以上で等間隔に配列している格子点は転移に伴い格子変形を起こし、交換相互作用の値も変化する。交換相互作用が一定である量子スピン相では量子揺らぎのため一重項状態が三重項状態などの他の状態と縮退しているのに対し、SP 相ではその縮退が解けて一重項状態のエネルギーは下がる。結果として SP 転移に伴い、格子系のエネルギーは格子変形によって増加するが、スピン系のエネルギーは減少する。つまり、量子スピン相では格子変形によるエネルギー増加とスピン系のエネルギー減少が競合していると言える。

CuGeO₃ は無機化合物で初めて SP 転移の存在が確認された物質である。CuGeO₃ の帯磁率は、約 14K 以下で温度の減少に伴い全方向の帯磁率が減少し、低温では指数関数的に減少する (図3)。これは基底状態が非磁性的でスピン励起にギャップがあることを示している。

近年の実験において、スピン・パイエルズ相におけるスピンギャップを THz 光で共鳴強励起すると、スピンギャップ吸収の消失が観測された。これは THz 光励起によるスピン・パイエルズ相の消失を示唆しているが、量子スピン相への光励起相転移であるのか、他のスピン秩序状態を形成しているのか、その機構は明らかではない。本研究では、ポンププローブ分光法を用いてこの現象のダイナミクスを明らかにすることを目的とする。

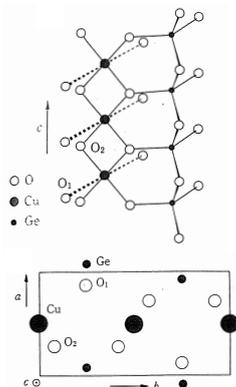


図 1: CuGeO₃ の結晶構造 [1]

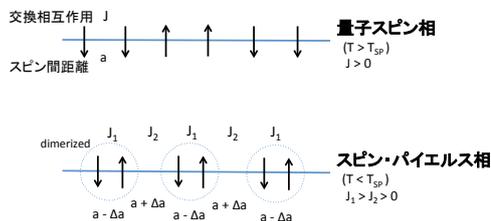


図 2: スピン・パイエルズ転移による格子変位と交換相互作用の変化

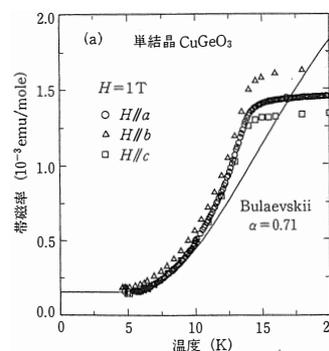


図 3: 単結晶 CuGeO₃ の帯磁率の温度依存性 [2]

[1] H. Vollenkle, A. Wittmann and H. Nowotny, Monatsh. Chem., **98**, 1352 (1967).
 [2] M.Hase, I. Terasaki and K.Uchinokura, Phys. Rev. Lett., **70**, 3651 (1993).

二重 4f 光学系による超短光パルスの時空間波形整形

東北大理

篠田尚輝, 吉澤雅幸

Spatiotemporal pulse shaping of ultrashort optical pulse based on double 4f system

Tohoku Univ.

N. Shinoda and M. Yoshizawa

超短光パルスの波形整形においてフーリエ空間（周波数空間）で変調を与え、任意の時間特性を持つ光パルスの発生が可能となっている。また、時間特性だけでなく空間特性も含めた制御として、Nelson らが時間と空間 1 次元の特性制御に成功している[1][2]。

本研究では時間と空間 2 次元の制御を行い、任意の時空間特性を持つ光パルスの発生を目指す。このために Nelson らが利用した 4f 光学系にさらにもう 1 組、図 1 のように光位相変調器とシリンドリカルレンズを組み合わせる。まず、光位相変調器 (SLM1) の下半分に光を当てる。SLM1 には領域により垂直方向の偏角が異なる変調を与え、シリンドリカルレンズ 1 (CL1) によってもう 1 台の光位相変調器 (SLM2) の異なる高さに投影する (図 1 (a) 水平視点)。グレーティングとシリンドリカルレンズ 2 (CL2) では水平方向に分光を行うので、SLM2 では高さ方向で異なる時間変調を与えることができる。時間変調された光は SLM1 の上半分に戻り、初めと同じ偏角を与えて元の方角に戻す (図 1 (b) 垂直視点)。この方法では、SLM1 で与えた偏角に応じて異なる時間変調が得られるため、2 次元空間の各領域の時間変調を個々に制御できる。測定には光カーゲートを利用し、CCD カメラにより光パルスの空間領域と時間領域の両方を測定する。また今回の実験では SLM2 の代わりに変調マスクで簡易的な時間変調を与えている。

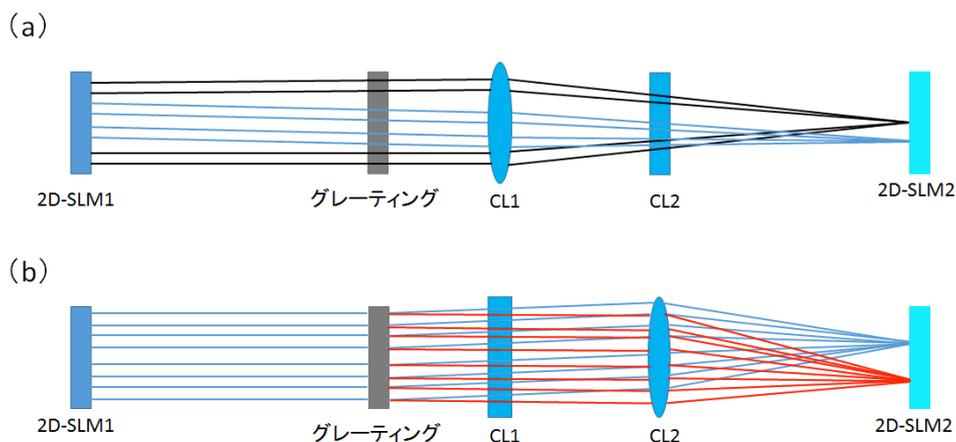


図 1 二重 4f 光学系の概略 (a) 水平視点 (b) 垂直視点

[1] J.C. Vaughan, T. Feurer, and K.A. Nelson, *Opt. Lett.* **28**, 2408 (2003).

[2] T. Hornung, J.C. Vaughan, T. Feurer, and K.A. Nelson, *Opt. Lett.* **29**, 2052 (2004).

講演題目: κ -(BETS)₂Fe_{1-x}Ga_xBr₄ の輸送特性と熱的性質

東邦大理^A, 理研^B

佐藤俊^A, 宇都宮一広^A, 田嶋尚也^A, 梶田晃示^A, 西尾豊^A, 加藤礼三^B

Title: Transport property and thermal property of κ -(BETS)₂Fe_{1-x}Ga_xBr₄

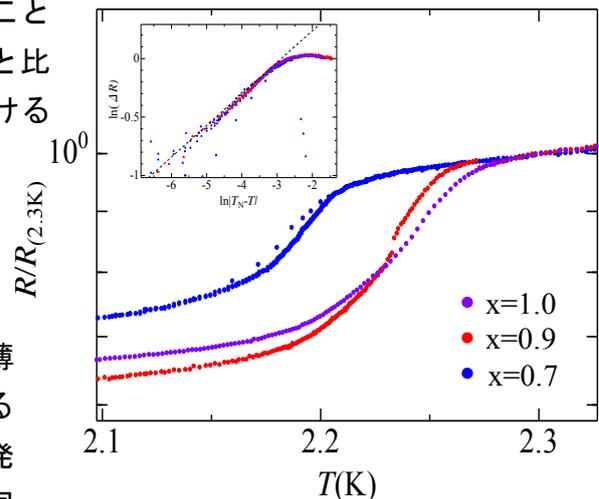
Toho-Univ^A and Riken^B

Shun Sato^A, Utsunomiya Kazuhiro^A, Naoya Tajima^A,
Kajita Kouji^A, Yutaka Nishio^A, Kato Reizo^B

Keywords: 有機導体, 電気抵抗, 磁性,
Organic Conductor, Resistivity, Magnetism

表題物質は BETS 分子の作る伝導面と Anion の作る絶縁面が積層した構造を持つ有機超伝導体であり、反強磁性と超伝導の共存や、磁場誘起超伝導などの特異な物性を示すことが知られている。これらの起源は伝導性を担う BETS 分子の π 電子と磁性を担う Anion の電子 (d スピン) との相互作用であると考えられているが、詳細は未だに不明である。本研究の目的は Fe 原子を Ga 原子に置換することで d スピンの濃度を低下させながら電気抵抗と比熱を測定することで、磁気秩序転移温度における伝導と磁性の臨界現象がどのように変化するかを明らかにし、 d スピンおよび π 電子の磁気秩序、超伝導における役割の解明を試みることである。

本研究における抵抗測定では d スピンの稀薄化によって反強磁性転移が低温への抑制されることや、超伝導転移が高温側へ移動し、その発現が容易化される傾向が観測された。また、同研究室の奥澤、牟田らの研究報告を基にして反強磁性転移近傍での特異な抵抗減少についての解析を行った結果、その起源が反強磁性秩序化に伴う内部磁場の発達によるものではないかという考察が得られた。



図, κ -(BETS)₂Fe_{1-x}Ga_xBr₄ 種々の試料での T_N 近傍での抵抗異常
※挿入図は抵抗減少の温度に対する冪乗則を指示 $\Delta R \propto (T_N - T)^{0.28 \pm 0.08}$

κ -(BETS)₂FeBr₄ および κ -(BETS)₂FeCl₄ の磁場下での熱的性質

東邦大理

宇都宮一広, 佐藤俊, 西尾豊, 田嶋尚也, 梶田晃示

Thermal property of κ -(BETS)₂FeBr₄ and κ -(BETS)₂FeCl₄ under magnetic field

Toho Univ

Kazuhiro Utsunomiya, Shun Sato, Yutaka Nishio, Naoya Tajima, Koji Kajita

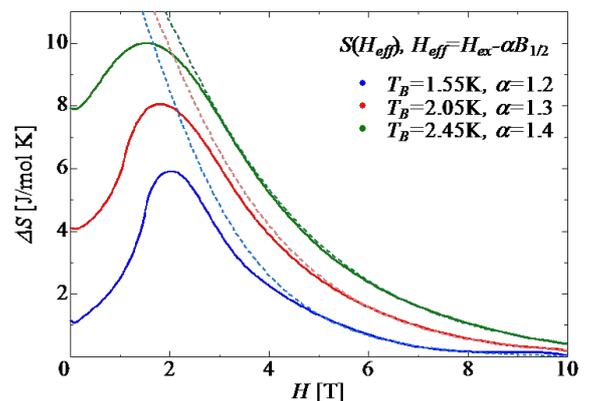
Keywords: 有機導体, 磁性, 熱的性質,

Organic conductor, Magnetism, Thermal property

κ -(BETS)₂FeBr₄ および κ -(BETS)₂FeCl₄ は擬 2 次元有機超伝導体である。BETS 分子伝導層と FeBr₄ (あるいは FeCl₄) アニオン絶縁層が交互に積層しており、伝導層の π 電子と絶縁層の 3d スピンの間に強い π -d 相互作用が存在する。極低温において常磁性-反強磁性転移と金属-超伝導転移を起こすことが知られている。また、反強磁性と超伝導が共存するという性質を持つ。この系は、磁場の印加に伴い反強磁性転移と超伝導転移が共に抑制され、 $H > 2$ T では常磁性金属状態となる。また、 $H = 11 \sim 14$ T の強磁場下では π -d 相互作用に起因して超伝導が再度出現する磁場誘起超伝導が見られる。^[1]

現在、磁場中における π 電子と 3d スピンの関係、特に π 電子が 3d スピンに与える影響を調べることを目的に、比熱の温度依存性及び磁気熱量効果の測定を予定している。磁場を一定にした比熱の温度依存性の測定からは、3d スピンの振る舞いについての解析できることが期待される。また、磁気熱量効果の測定からは、3d スピンの磁場掃引に伴うエントロピー変化について解析できることが期待される。

κ -(BETS)₂FeBr₄ についてすでに行われた比熱および磁気熱量効果の測定から、外部磁場がそのまま d スピンに作用している場合に期待される結果とは異なり、 π -d 相互作用による有効磁場が影響した電子状態が期待される結果となった。また、磁気熱量効果から求めた常磁性金属領域のエントロピーの解析より、この特異な電子状態における π -d 相互作用による内部磁場を定量的に評価した。



図：1.55 K, 2.05 K, 2.45 K でのエントロピーの磁場依存性。破線は π -d 相互作用による有効磁場を考慮したモデルで求めた理論値である。

[1] H. Kobayashi *et al.*: Chem. Rev., **104** (2004) 5265

断熱近似を超えた格子の量子揺らぎ

山形大院, 名工大^A, 山形大^B
 渡邊侑子, 志田佳祐, 五味広喜^A, 高橋聡^A, 富田憲一^B

Quantum lattice fluctuations beyond the adiabatic approximation

Grad. Sch. Yamagata Univ., Nitech^A, Yamagata Univ.^B
 Y. Watanabe, K. Shida, H. Gomi^A, A. Takahashi^A, and N. Tomita^B

キーワード : 共鳴 HF 法, コヒーレント表示, SSH モデル, 非断熱近似

Keywords : Res-HF method, coherent representation, SSH model, beyond the adiabatic approximation

ポリアセチレンのような一次元系では、1/2-filling で Peierls 不安定性のため格子が結合交替を起こし、絶縁体になることが知られている。結合交替のパターンでは長短長短...となる A 相と、短長短長...となる B 相が縮退している。電子を励起、もしくはドーブした場合、ソリトンと呼ばれる A 相と B 相をつなぐ位相欠陥が生成される。これまでも、ソリトンが形成されることでギャップ内にエネルギー準位が作られ、伝導性を示す可能性について議論されてきている。

このような一次元電子-格子系を扱うモデルとしては、Su-Schrieffer-Heeger (SSH) モデルがある。このモデルに関しては、電子相関効果について精力的に研究されている一方、格子構造は古典的かつ断熱的に扱われることが多い。しかし、本来このような電子-格子相互作用が強く物性に寄与する系では、両者共に量子的に扱い、格子も非断熱的に扱うことが望ましい。そこで、格子を量子的に扱うために、共鳴 Hartree-Fock 法を拡張し、コヒーレント状態 $|\varphi_f\rangle$ と Slater 行列式 $|\psi_f\rangle$ の直積を重ね合わせた状態で系を記述する。

$$|\Psi\rangle = \sum_P \sum_f C_f P |\psi_f, \varphi_f\rangle$$

この方法により、断熱近似を超え、電子-格子系の大振幅量子揺らぎを取り込んで計算することができる。

我々は今回、この方法を一次元 SSH 型の電子-格子相互作用を伴った拡張ハバードモデル

$$H = - \sum_{i,\sigma} (t - \alpha X_i) (c_{i+1,\sigma}^\dagger c_{i,\sigma} + c_{i,\sigma}^\dagger c_{i+1,\sigma}) \\ + \sum_i \left(\frac{1}{2M} p_i^2 + \frac{K}{2} X_i^2 \right) + U \sum_i n_{i,\uparrow} n_{i,\downarrow} + V \sum_i n_{i+1} n_i$$

に適用した。その結果、half-filled の電荷密度波 (CDW) 系において格子は等間隔になるが、ドーブされた CDW 系の格子揺らぎは、ソリトンの並進運動と振動運動によって記述できることが明らかになった。

ベイズ統計とカーネル法によるスケーリング解析

所属 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

発表者 島垣 凱

Keywords : Kernel 法, ベイズ統計, スケーリング理論

実験で得られた数値データをもとに関数関係を推定したい状況を考える。例えば、磁場や温度に対する磁化率の変化等である。この様な状況は d 個の入力変数 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_d)$ に対して、出力変数を y とし、入力された N 個のサンプルの組み $\{\mathbf{x}^{(n)}, y_n\}_{n=1}^N$ をもとに関数を推定する問題である。この関数推定に用いられる強力な手法として、カーネル法という線形回帰の手法が知られている。カーネル法を紹介する前に、最小二乗法による基本的な線形回帰を眺めておくと理解しやすい。まず、パラメータを \mathbf{w} とし、パラメータに関しての線形モデルを仮定し、二乗誤差関数 $R(\mathbf{w})$ を考える。すなわち、

$$y = \mathbf{w}^T \mathbf{x} = \sum_{i=1}^d w_i x_i, \mathbf{w} \in \mathbb{R}^d \quad (1)$$

$$R(\mathbf{w}) := \sum_{n=1}^N (y_n - \mathbf{w}^T \mathbf{x}^{(n)})^2 = (\mathbf{y} - X\mathbf{w})^T (\mathbf{y} - X\mathbf{w})$$

この $R(\mathbf{w})$ を \mathbf{w} に対して最小にすればいい。結果は $\mathbf{w} = (X^T X)^{-1} X^T \mathbf{y}$ である。しかしながら、線形モデル(??)はサンプル数がいくら増えても直線近似でしか表現できない。 x に関して非線形にするには $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{d'}$ という非線形関数を基底とすればいい。基底を $\{\phi_i\}_{i=1}^{d'}$ とする線形モデルとして、計画行列として知られている Φ を用いると二乗誤差関数 $R(\mathbf{w})$ は

$$y = \sum_{i=1}^{d'} w_i \phi_i(\mathbf{x}), \mathbf{w} \in \mathbb{R}^{d'}, R(\mathbf{w}) = (\mathbf{y} - \Phi\mathbf{w})^T (\mathbf{y} - \Phi\mathbf{w}) \quad (2)$$

この非線形関数を間に挟ませる事を特徴抽出と呼び、パターン認識の分野では古くから知られている [3]。一般に元の x_1, \dots, x_d の空間よりも $\phi_1, \dots, \phi_{d'}$ の空間は高次元になっていることに注意されたい ($d \leq d'$)。誤差関数を最小にする \mathbf{w} は同じ議論で $\mathbf{w} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \mathbf{y}$ である。 $\boldsymbol{\alpha} := \Phi^T \mathbf{w}$ と定義すると、誤差関数はグラム行列と呼ばれる $\Phi \Phi^T$ のみで表現される。ここでようやく主役であるカーネル法が現れる。カーネル法はグラム行列の要素である d' 個の基底関数の組みを考える代わりに、たった一つのカーネル関数 $k(x, x')$ を導入する。

$$K := \Phi \Phi^T, K_{n,n'} = \sum_{i=1}^{d'} \phi_i(\mathbf{x}_n) \phi_i(\mathbf{x}_{n'}) \quad (3)$$

カーネル法を使う利点は、カーネル関数による変換のデータに対する線形の解析が比較的少ない計算量で済むことができる点である。今回はベイズ統計と上で紹介したカーネル法を組み合わせ、臨界点を含む領域のスケーリング解析に応用した研究例の報告をする。

[1] K.Harada, Phys. Rev. E 84, 056704 (2011) [2] Bishop, C. M. (2006) Pattern Recognition and Machine Learning . New York; Springer. [3] 赤穂昭太郎, カーネル多変量解析, 岩波書店, (2008).

ベイズ統計における相転移理論の構築

東大新領域

徳田悟, 永田賢二, 岡田真人

Constructing a theory of phase transitions in Bayesian statistics

The Univ. of Tokyo.

Satoru Tokuda, Kenji Nagata and Masato Okada

Keywords: ベイズ統計, 相転移, ベイズ比熱, 時間分解分光

ベイズ統計と統計力学は数理的に等価である。ベイズ統計は与えられた観測データからそれを生成した確率分布を推測する枠組みである。ベイズ統計は、例えば分光スペクトルのピーク分離において、その有効性を発揮する。図1のように複雑なスペクトルを解釈する際、目視によるピーク数 K の判別は恣意性を孕む。ベイズ統計では、ベイズ自由エネルギーという評価関数の最小化を以て、適切なピーク数 K を客観的に決定する。ベイズ自由エネルギーは、サンプル数 n が十分に大きいとき、データと回帰関数の間の誤差を表すエネルギー項と回帰関数の複雑さを表すエントロピー項に展開される。これら二項のトレードオフの下で、適切なピーク数 K が定まるのである。ここで問題となるのが、サンプル数 n が不十分であるとき、こうした適切さが保障されないことである。サンプル数の十分性はデータの S/N 比に依存する。これは化学反応のようなダイナミクスを測定する時間分解分光に関わる点で重要である。通常、スペクトルは複数回の測定を積算することで、S/N 比を増大させる。一方、経時変化を追う要請から、時間窓当りの計測時間を短縮すると、測定回数が満足に確保できず、S/N 比は小さくなる。こうしたトレードオフの下、ピーク分離に十分な S/N 比であり、それを担保するために必要最小限の計測時間を見積もることは重要な課題である。この課題に対し、我々はベイズ比熱という新たな統計量を導入することでその解決を図る。人工データを用いた数値実験の結果、図2のように、サンプル数と S/N 比で定まる実効的なデータ量に応じて、ベイズ統計に基づくピーク分離が、物質の三相に似た質的な変化を示すことを発見した。十分なデータ量というものが、ベイズ比熱の極大値として定義される転移点に対応することが分かった。

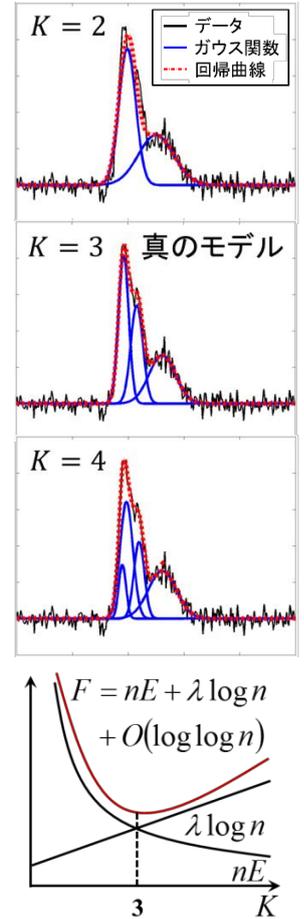


図1: ベイズ統計

[1] 渡辺澄夫, ベイズ統計の理論と方法, コロナ社, 2012.

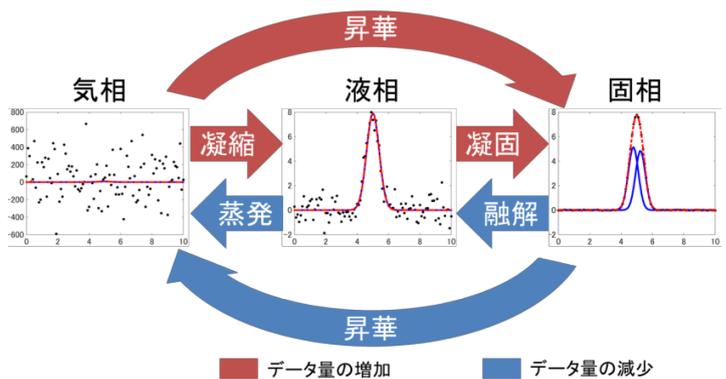


図2: ベイズ統計における相転移現象

非局所結合位相振動子系における persistent chimera state

北海道大学大学院 理学院

須田裕介

Persistent chimera states in nonlocally coupled phase oscillators

Division of Physics, Hokkaido Univ.

Yusuke Suda

Keywords : 非線形物理, 結合振動子系, 数値計算

散逸系における自己組織化されたリズム現象はしばしば位相振動子としてモデル化され、物理学のみならず化学、生物学など様々な分野にわたって研究されている。 N 個の非局所的に結合した一次元位相振動子系は

$$\frac{d}{dt}\theta_j(t) = \omega - \frac{1}{2R} \sum_{k=j-R}^{j+R} \sin(\theta_j(t) - \theta_k(t)) \quad (1)$$

として表される。これは自然振動数 ω を持つ位相振動子 θ_j ($j = 1, \dots, N$) が結合半径 R 内の他の位相振動子と相互作用しているモデルを表したものである。適当なパラメータ下で式 (1) を数値計算すると、位相が空間的に連続で、単一の平均振動数を持つ同期領域 (coherent) と、位相が空間的な連続性を完全に失い、平均振動数もバラバラな非同期領域 (incoherent) が共存する、奇妙な安定状態が現れる (図 1)。この状態はキメラ状態 [1] と呼ばれ、現在では様々な非線形振動子系で起こる現象として、多くの研究者の注目を集めている。

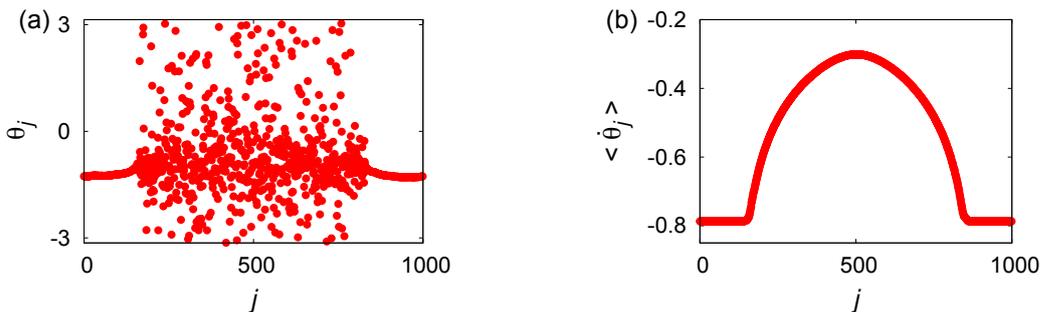


図 1: キメラ状態の (a) 位相パターンと (b) 平均振動数

キメラ状態は連続極限 $N \rightarrow \infty$ 下では時間的に安定であることが知られている。しかし、近年 N が小さい系においてキメラ状態は chaotic transient であり、時間発展の中で突然消滅して完全同期状態に遷移することが報告された [2]。

本研究では、結合関数に 2 倍波成分まで用いることで、振動子数 N が小さい場合でも transient でないキメラ状態の存在を数値計算により確認した。また、当日は図 1 とは異なるキメラ状態の存在についても合わせて紹介する予定である。

[1] Y. Kuramoto and D. Battogtokh, Nonlinear Phenom. Complex Syst. **5**, 380 (2002).[2] M. Wolfrum and O. E. Omel'chenko, Phys. Rev. E **84**, 015201(R) (2011).

情報熱力学による生命科学へのアプローチ

東京大学総合文化研究科 金子研究室

山本峻平

Information Thermodynamics Approaches to Biology

Dept. of Basic Sci. Univ. of Tokyo

Shumpei Yamamoto

Keywords : 情報熱力学、非平衡、生物物理

近年、情報理論と統計熱力学を融合した、情報熱力学と呼ばれる新しい分野が成立しつつある [1]。当初の動機であった Maxwell の悪魔のパラドックスはフィードバック制御の熱力学として解決をみたが、自律的に情報をやりとりするような系についての理解はまだ途上にあり、さまざまな研究が行われている（この分野での私の研究については分科会「情報熱力学における Onsager の相反関係」で話す予定）。自律的情報処理の問題は特に生命科学への応用において重要だと考えられている。

しかし実際問題として、今の所、情報熱力学の生命科学への応用として、ある程度確立した話題は生体内シグナル伝達 [2] や Sensory Adaptation [3] ぐらいであり、情報熱力学で生命現象を理解する、という大目標に向けては、道半ばどころか始まったばかりという印象である。

とはいえ、既存の情報熱力学を踏まえた上での Synthetic Biology の観点からの話題 [4] や Kinetic Proofreading へのアプローチ [5][6] 等々も出始めており、新しい時代の到来を予感させる雰囲気はある。単に既存の情報熱力学や非平衡統計力学を生物へ応用するだけでなく、現在の物理学・情報理論・生命科学の個別の知見を超えた新しい分野の創出を個人的には期待している。

大言壮語したが、新しい話題が多いので、ポスター・セッションでどこまで何を紹介するかは未定である。オリジナルな話題はほとんど無いかもしれないが、分科会でやる予定の内容の生物への応用等も可能なら議論したいので、そちらの予稿も参照していただきたい。

[1] JMR. Parrondo, JM. Horowitz, T. Sagawa, *Nature Physics* **17**, 045012(2015)

[2] S. Ito, T. Sagawa, submitted. (2014). to appear in *Nature Communications*

[3] P. Satori *et al.*, *PLoS Comput. Biol.*(2014)

[4] P.Mehta, AH. Lang, DJ. Schwab, preprint arXiv:1505.02474 (2015)

[5] P. Sartori, S. Pigolotti, preprint arXiv:1504.06407 (2015)

[6] R. Rao, L. Peliti, preprint arXiv:1504.02494 (2015)

ランダムポテンシャル中を流れる超流動 Bose 系における 臨界速度

京都大学理学研究科物理学・宇宙物理学専攻

芳賀大樹

Critical velocity of superfluid Bose gas flowing in a random potential
Department of Physics, Kyoto University
Taiki Haga

Key Words: 超流動, ランダム系, Superfluid, disordered system

散逸を伴わない流れによって特徴付けられる超流動は、相互作用する Bose 粒子系の示す最も顕著な性質の一つである。非一様な環境中を流れる Bose 系は、その速度がある臨界速度 V_c を越えると不安定になり、超流動状態が壊れてしまうことが知られている。

本研究では、ランダムポテンシャル中における弱く相互作用する Bose 粒子系の臨界速度を調べる。Bogoliubov 理論[1]をランダムポテンシャルと流れが存在する場合に拡張することで、凝縮密度や超流動密度の流速 V に関する依存性を議論する。我々は特に超流動密度と臨界速度 V_c との間の関係に注目する。流速 V が増大するほど、準粒子はランダムポテンシャルに強く散乱されるため、超流動密度は減少する。 $V = V_c$ 近傍での超流動密度の振る舞いを調べることで、ランダムポテンシャルが十分に強い場合には、超流動密度は $V = V_c$ において連続的に 0 となる一方で、ランダムポテンシャルが弱い場合には、超流動密度は $V = V_c$ においても有限の値を取ることを示す。

さらに、流れが存在する際に準粒子の運動量分布関数 n_q は原点の近傍で q^{-4} なる特異性を持つこと、それゆえ 2 次元と 3 次元では熱力学的極限の下で凝縮密度は 0 になってしまうことを示す。これは、 V_c は系のサイズを増大させると共に減少し、無限系では 0 となることを意味する。

[1] V.I. Yukalov, R. Graham, “Bose-Einstein-condensed systems in random potentials”, Phys. Rev. A **75**, 023619 (2007).

くりこみ群による横磁場 Ising 模型の臨界指数の推定

東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻関連基礎科学系

金子 和哉

The use of renormalization group in estimating critical exponents of the transverse field Ising model

The University of Tokyo, Department of Basic Science

Kazuya Kaneko

Keywords : Statistical Mechanics, Phase Transition

横磁場 Ising 模型は次のハミルトニアンで与えられる量子スピン系である。

$$H_{\text{TI}} = -J \sum_{\langle ij \rangle} \sigma_i^z \sigma_j^z - \Gamma \sum_i \sigma_i^x \quad (J: \text{結合定数}, \Gamma: \text{横磁場}) \quad (1)$$

d 次元横磁場 Ising 模型は $d+1$ 次元古典 Ising 模型と同じ普遍類に属するため、2 次元横磁場 Ising 模型の臨界指数を求めることは、未だに分かっていない 3 次元 Ising 模型の臨界指数を求めることに等しい。

量子臨界現象の研究で強力な方法にくりこみ群解析がある。通常の実空間くりこみ群では、くりこみ操作により新たに得られたハミルトニアンに元々のハミルトニアンには無かった多体系の相互作用が現れる問題がある。横磁場 Ising 模型の場合にはハミルトニアンの \mathbb{Z}_2 対称性を上手く利用すると、変換後のハミルトニアンに新たな相互作用項が現れることを防ぐことができる。このくりこみ群変換を用いて解析を行うと、相関長の臨界指数 ν について 1 次元の場合には厳密な値を、高次元の場合にも他の数値計算と近い値が得られることが分かっている [1, 2]。しかしながら、この \mathbb{Z}_2 対称性を利用した方法により臨界指数 ν について良い値が得られる理由については厳密には分かっている。

本発表では、量子情報の分野から生まれ臨界現象の解析にも応用されている Quantum Fidelity の考えを使うことで、臨界指数の値がうまく求まることの説明を行う。

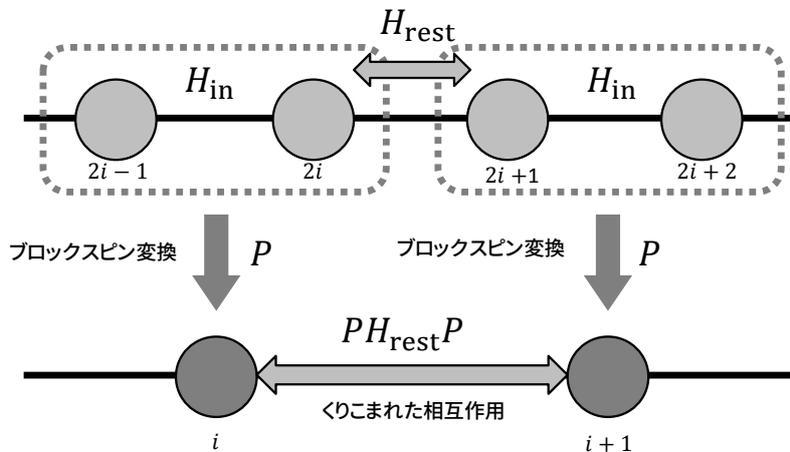


図1 くりこみの操作：2つのスピンを1つのブロックにまとめて、1つのスピんに置き換える。

[1] R. Miyazaki, H. Nishimori, and G. Ortiz, Phys. Rev. E **83**, 051103 (2011).

[2] A. Kubica, and B. Yoshida, e-print arXiv:1402.0619.

確率過程と一般化量子マスター方程式による揺らぎの定理の導出

東京工業大学理工学研究科物性物理学専攻

深代隆央

Derivation of Fluctuation Theorem with stochastic process and generalized quantum master equation *Department of Physics, Tokyo Insistitute of Technology*

Takahisa Fukadai

Keywords : 非平衡、揺らぎ、マルコフ連鎖、一般化量子マスター方程式

平衡系には熱力学第二法則のような系の詳細に依らず広く成り立つ法則がある。一方で、線形応答領域を超えた非平衡系において、このような普遍的な法則が存在する否かは長らく謎であった。しかしながら、20年ほど前に今日揺らぎの定理として知られるエントロピー生成に関する対称式が存在する事が示された [1,2]。今回、この揺らぎの定理の特別な場合である、系が定常状態である時に成り立つ定常揺らぎの定理を二通りの方法 [3,4] で導出する。

一つは系の時間発展をマルコフ連鎖によりモデル化する事により導出を行う。ある初期分布と確率行列を定めると一つのマルコフ連鎖が定まる。このマルコフ連鎖を順過程と呼び、この順過程における終分布を初期分布とするマルコフ連鎖を逆過程と呼ぶ事とする。系の時間発展をマルコフ連鎖の形式で取り扱う場合は、順過程と逆過程の軌道が一对一に対応づく事を用いることにより、これら二つの過程における系と熱浴で生じたエントロピーの母関数の間にある対称性が存在する事を示す。特に、初期分布が定常分布である場合にはこの対称性は定常揺らぎの定理に等しい事を示す。

もう一つは系として量子系を想定し、系の時間発展を量子マスター方程式の形式で取り扱う。系と熱浴の相互作用が弱いとして相互作用の項を摂動的に扱い、母関数を特徴付けるパラメータを含んだ量子マスター方程式 (一般化量子マスター方程式) を導出する。この方程式から、ある二つの近似の下では長時間後において母関数に対称性が成り立つ事を示す。さらに、大偏差関数を用いてこの対称性を書き直すと定常揺らぎの定理に等しい事を示す。さらに、導出した定常揺らぎの定理をマルコフ連鎖を用いた手法ではモンテカルロ・シミュレーションを行う事により、一般化量子マスター方程式を用いた手法では数値計算を行う事により検証する。

[1] D. J. Evans, E. G. D. Cohen, G. P. Morris, *Phys. Rev. Lett.* **71**, 2401(1993)

[2] C. Jarzynski, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 2690(1997)

[3] G. E. Crooks, *Phys. Rev. E*, **61**, 2361(2000)

[4] M. Esposito, U. Harbola, and S. Mukamel, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 1665(2009)

1次元ハミルトニアン系における KPZ 普遍性

東京工業大学 理工学研究科

園田 柁平, 笹本 智弘

KPZ Universality in 1D Hamiltonian Systems
Department of Physics, Tokyo Institute of Technology
 Shuhei Sonoda, Tomohiro Sasamoto

Keywords : KPZ 普遍性, Nonlinear Fluctuating Hydrodynamics

20 世紀後半に理解が進んだ平衡系の臨界現象におけるスケーリング則のような普遍性が、自己駆動粒子系や開放駆動系といった平衡状態から遠く離れた非平衡系において、どのように議論されるかは現代統計力学の大きな問題の一つである。非平衡系における普遍性は臨界現象だけでなく発達乱流、パターン形成など多岐に渡って現れ、特に KPZ 普遍性クラスという紙の燃焼やがん細胞の成長といった界面成長過程における普遍性クラスに関して、理論・実験物理、数学に渡って近年急速に理解が進んでいる [1][2][3]。

KPZ 普遍性を示す数理モデルは Asymmetric Simple Exclusion Process (ASEP) や Polynuclear Growth (PNG) モデルなど、確率的な時間発展によって記述されるモデルでのみ確認されていた。しかし、近年の進展として、並進不変性を持つ 1次元ハミルトニアン系に定常 KPZ クラスと同じ揺らぎが現れる可能性が指摘された [4]。そこで、Spohn は熱平衡状態に置かれた古典系非調和鎖の保存量に成り立つ局所保存則を、揺らぐ流体方程式というノイズの入った流体力学方程式で近似し、従来の線形精度から 2 次の非線形精度に拡張することで、1次元非線形格子の二点相関関数が定常 KPZ 普遍性サブクラスの二点関数と同じスケーリング関数で表されることを予言した [5][6]。

本ポスター発表では Spohn の研究である非線形な揺らぐ流体方程式による非調和鎖の解析について紹介し、分子動力学法に基づいたシミュレーションによる検証結果について発表する。

References

- [1] M. Kardar, G. Parisi, Y. C. Zhang, Dynamic scaling of growing interfaces, *Phys. Rev. Lett.* **56**:889-892, (1986)
- [2] I. Corwin, The Kardar-Parisi-Zhang Equation and Universality Class, *Random Matrices Theory Appl.* **1**, 1130001, (2012)
- [3] K. A. Takeuchi, Experimental approaches to universal out-of-equilibrium scaling laws: turbulent liquid crystal and other developments, *J. Stat. Mech.* **2014**, P01006, (2014)
- [4] H. van Beijeren, Exact results for anomalous transport in one-dimensional Hamiltonian systems, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 180601, (2012)
- [5] H. Spohn, Nonlinear Fluctuating Hydrodynamics for Anharmonic chains, *J. Stat. Phys.* **154**, 1191, (2014)
- [6] H. Spohn, Fluctuating Hydrodynamics approach to equilibrium time correlations for anharmonic chains, arXiv:1505. 0598, (2015)

Classical Dynamical Localization

所属 京都大学理学研究科物理教室^A

発表者 三宅 隼斗^A

紹介論文 ”Classical Dynamical Localization”^[1]

Department of Physics, Graduate School of Science, Kyoto University^A

Name of presenter Hayato Miyake^A

Keywords: quantum chaos, Anderson localization, kicked rotor, triangle map

この発表では、”Classical Dynamical Localization”の論文紹介を行う [1]。
本論文では、2次元のカオス力学系の典型的なモデルとして Kicked Rotor を考え、その量子系においてみられる現象として Dynamical Localization について理論的に考察する。Dynamical Localization とは古典カオスの力学系にみられる運動量の拡散が量子化したときに「抑制」される効果をさす。この効果について S.Fishman らは、具体的に Kicked Rotor Model を取り上げその量子系を2次元の tight-binding モデルと対応させることでアンダーソン局在との類似性を指摘した [2]。本論文では最初に、S.Fishman らの議論に従い Dynamical Localization をアンダーソン局在と対応させる議論を再考する。次に古典カオス系のポテンシャルを区分線形化したモデルを考える。このとき、運動量の拡散を数値的にみると拡散のふるまいが変わることを具体的に Generalized Triangle Map について見る。この理論的な考察として S.Fishman らの議論を再度適用して古典力学系においてもアンダーソン局在と類似の効果が現れることを議論する。

[1] Itano Guarneri, Giulio Casati and Volker Karle, Phys. Rev. Lett. **113**, 174101 (2014)

[2] Shmuel Fishman, D. R. Grempel, and R. E. Prange, Phys. Rev. Lett. **49**, 509 (1982)

異常輸送と巨視的ゆらぎの理論について

慶應義塾大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻 理論研究室

玉木 脩二

Anomalous Transport and Macroscopic Fluctuation Theory
Graduate School of Science and Technology, Keio University

Shuji Tamaki

Keywords : 異常輸送, 1次元格子系の熱輸送, 巨視的ゆらぎの理論 (MFT)

温度の異なる熱浴を接続すると高温側から低温側に向かって熱が流れる。このとき熱浴の温度差を一定に保つとやがて系は定常状態に達し、熱流の平均値は変化しなくなる。図1のように、二つの温度の異なる熱浴 ($T_L > T_R$) に繋がれた1次元の系を伝わる熱流を J とする。本研究では、ある時間 τ の間熱流を測定し、この間に系を流れた熱の総量 $Q = \int_0^\tau dt J(t)$ を問題にする。同じ条件下でこの測定を繰り返すと、 Q はある平均値のまわりにばらついて分布する。このばらつきの分布 $P_\tau(Q)$ が本研究で調べる対象である。

さて、1次元の系ではしばしば異常輸送が生じる[1]。異常輸送とは $\langle J \rangle = \kappa(T_L - T_R)/N$ (N は系を構成する粒子数) によって定義される熱伝導率 κ が N にべき依存して発散するような輸送である (異常に多くの熱が輸送されるという意味)。一方、 κ が N によらない場合を正常輸送と呼ぶ。

正常輸送の場合に関して Bertini らの研究グループが提案した巨視的ゆらぎの理論 (MFT) によると、 $P_\tau(Q)$ は τ が大きい場合に

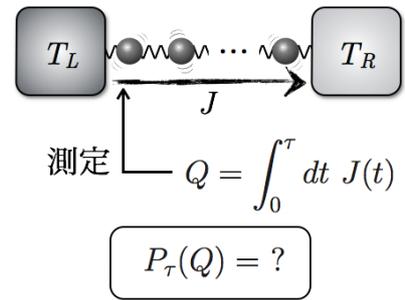


図1 系の模式図

$$P_\tau(Q) \sim \exp \left[-\tau \min_{T(x)} \frac{1}{N} \int_0^1 dx \frac{\left(N \frac{Q}{\tau} + \kappa(T) \frac{dT(x)}{dx} \right)^2}{4\kappa(T)T^2} \right] \quad (1)$$

で与えられる [2] (x は系に沿った空間座標)。つまり、最も起こりやすい Q は各位置での温度勾配に熱伝導率をかけたものを全体にわたって貼り合わせたものであり、ゆらぎは平衡での熱流ゆらぎとして与えられるというものである。

自然な疑問として、異常輸送の場合でも MFT によって説明することができないかということが考えられる。本研究では粒子間の相互作用に非線形性を考慮した場合を取り扱った。非線形性は文献 [5] で扱われているような、運動量を保存するようなノイズとして実現した。数値的に Q のキュムラントを計算し、式 (1) によるそれとを比較した。結果はまだ吟味が必要であるが、MFT との一致に肯定的なものであると考えている。

[1] S. Lepri *et al*, Phys. Rep. **377**, 1 (2003)[2] L. Bertini *et al*, Phys. Rev. Lett. **87**, 040601 (2001)[5] S. Lepri *et al*, J. Phys. A: Math. Theor. **42**, 025001 (2009)

Bi-Te 系化合物における熱電性能に関する理論研究

青山学院大学大学院 理工学研究科 理工学専攻
基礎科学コース 望月研究室 1年
森 俊了

**First principles calculations of electric structure and thermoelectric properties
of Bi_2Te_3 and Bi_2Se_3**

*Master course student, Mochizuki lab, Department of Science and Engineering,
Graduate school of Science and Engineering, Aoyamagakuin University*

Takaaki Mori

Keywords: ビスマス, 熱電, 第一原理計算

熱電変換の性能指数 ZT は $ZT=S^2\sigma T/\kappa$ で表され、高い熱電性能を得るには、大きなゼーベック係数、小さな電気抵抗率、小さな熱電導度が必要とされる。近年、トポロジカル絶縁体(バルクはエネルギーギャップをもつ絶縁体だが、表面はギャップレスの金属状態となる物質)は熱電性能が良いものが多いことが経験的に知られている。

本研究では、第一原理計算と Boltzmann 方程式に基づく輸送係数の計算から、その原因の解明を目指す。高い熱電性能を持つトポロジカル絶縁体として Bi_2Te_3 、 Bi_2Se_3 に着目した。Bi のような重金属はスピン軌道相互作用の影響を大きく受けるため、スピン軌道相互作用の寄与を正確に取り入れたバルク状態のエネルギー分散を第一原理計算により求めた。得られたバンド分散から輸送係数を計算した結果、 Bi_2Te_3 、 Bi_2Se_3 の高いゼーベック係数がフェルミエネルギー近傍のバンドの形状に起因していることが確かめられた。次に、バルク構造をもとに薄膜に対応する第一原理計算を行い、表面状態を再現することにより、表面状態におけるゼーベック係数などの物理量の特異性について調べた。

磁気スキルミオン結晶における量子化トポロジカルホール効果

東京大学工学系研究科物理工学専攻^A, 理研 CEMS^B

濱本敬大^A, 江澤雅彦^A, 永長直人^{A,B}

Keywords : 理論計算、スキルミオン、量子化異常ホール効果、トポロジカルホール効果、トポロジー

空間反転対称性の破れた強磁性体中に現れる磁気スキルミオンは、渦状のスピンの配置を持つトポロジカルに安定な準粒子励起である (図1)。元々はハドロンのモデルとして提唱され、近年 MnSi や FeGe などのらせん磁性体中で実験的な観測がなされた。スキルミオンは数~数 10nm 程度の小さなサイズ、トポロジカルな安定性、微小電流での駆動可能性から高密度、不揮発性、低消費電力のメモリデバイスへの応用が期待され、近年実験理論の両面から爆発的に研究が進められている [1]。

また、スキルミオンのようにねじれたスピン構造を持つ物質中ではそのスピンの立体角に比例した有効磁場が創発され、電子の伝導特性に顕著な影響を与えることが知られている。この創発磁場によるホール効果は外部磁場なしでも生じる異常ホール効果の一種であり、特にトポロジカルホール効果と呼ばれる。スキルミオンにおいては創発磁場が 4000T にもおよび、そのホール電圧の観測はスキルミオンが形成されたことの実験的証拠として広く用いられている。スキルミオンが周期的に配列したスキルミオン結晶相ではその有効磁場も空間的に周期的なものとなるが、果たして、このような系で起こるトポロジカルホール効果は、通常の一様外部磁場によるホール効果と同様に理解されるのであろうか。

本研究では強磁場でのホール効果ということで量子ホール効果の発現可能性について久保公式に基づく理論計算を行った。スキルミオン結晶系における周期的有効磁場と一様磁場系を徹底的に比較し、その類似点、相違点を議論する。具体的には一様磁場による量子ホール系にみられるランダウ準位の形成、バンドのトポロジカル指数によるホール伝導度の量子化という通常のシナリオに沿った議論を試みる。さらに進んで、得られた結果からトポロジカルホール効果の量子化を実現しうる現実の物質パラメータと候補となる系についての提案を行う。このため実験家の方々とも積極的に議論を行いたい。

ポスター発表ではスキルミオンのレビューや量子ホール効果の原理など、基礎的な内容をメインに説明する予定である。

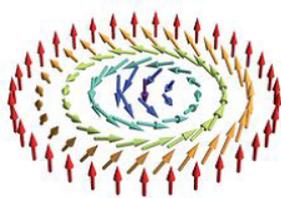


図 1: スキルミオン

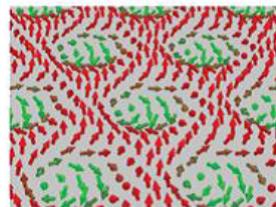


図 2: スキルミオン結晶

[1] N. Nagaosa and Y. Tokura, *Phys. Scr.* T146, 014020 (2012)

[2] K. Hamamoto, M. Ezawa and N. Nagaosa *arXiv* :1504.06024

Kitaev モデルにおける Majorana フェルミオン

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻
ミシエンコ ピョートル

Keywords : 量子スピン液体, Kitaev モデル, Majorana フェルミオン.

70年代の P. W. Anderson による提案以来, 量子スピン液体は, 磁性体に現れる新しい量子状態として長年精力的に研究されてきた. 近年, 2次元以上でも厳密に量子スピン液体が実現する Kitaev モデルとその拡張が提案され [1,2], そのトポロジカルな性質からも大きな注目を集めている. 最近になって, 量子スピンを Majorana フェルミオンとして取り扱う新しい量子モンテカルロ法が提案され, これらのモデルの熱力学的性質が詳しく調べられている [3]. しかしこの方法では, Majorana フェルミオンの取り扱いに厳密対角化を用いているために数値計算のコストが大きく, 興味のある2次元, 3次元の種々の格子構造に対する拡張が困難である. 本発表では, これまでの Kitaev モデルの研究を紹介するとともに, 厳密対角化ではなく多項式展開法を用いた数値計算の方法を紹介し, 今後の研究の展望を示す.

[1] A. Kitaev, Ann. Phys. (Berlin) **321**, 2 (2006).

[2] S. Mandal and N. Surendran, Phys. Rev. B **79**, 024426 (2009).

[3] J. Nasu, M. Udagawa and Y. Motome, Phys. Rev. Lett. **113**, 197205 (2014).

有機ディラック電子系 α -(BEDT-TTF)₂I₃について

東京大学 物性研究所^A

吉村健太^A, 長田俊人^A

The zero-gap organic conductor α -(BEDT-TTF)₂I₃

^A*Institute for Solid State Physics, University of Tokyo*

K. Yoshimura^A and T. Osada^A

Keywords: ディラック電子系, 有機導体

グラファイトをスコッチテープで劈開することにより、炭素原子 1 層のみでできた 2 次元物質グラフェンが発見された[1]。グラフェン中の電子はディラック方程式に従う相対論的粒子とみなせ、グラフェンはディラック電子系であることがわかっている。グラフェンの他に、圧力下における有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃ についてもディラック電子系が実現していると考えられている[2,3]。有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃ は、伝導を担う BEDT-TTF 分子の層と絶縁体である I₃ の層が交互に積層した擬 2 次元層状物質である。グラフェンとの違いとしては、ディラックコーンが傾いていること、バンドフィリングが固定されていること、伝導面の乱れが少ないことなどがあげられる。本発表では有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃ について説明し、今後の展望を述べる。

[1] K. S. Novoselov *et al.* , *Nature* **438**, 197 (2005)

[2] N. Tajima *et al.* , *Europhys. Lett.* **80**, 47002, (2007)

[3] N. Tajima *et al.* , *Phys. Rev. Lett.* **102**, 176403, (2009)

開放量子系において現れる量子相の研究

東京大学大学院

白井佑治

Quantum phases in Open Quantum Systems
Graduate school of Science, The University of Tokyo
Shirai Yuji

Keywords : 開放量子系, 散逸, 非平衡, 量子相, 量子情報, open quantum systems, dissipation, non-equilibrium, quantum phases, quantum information

近年、微細加工技術の進展にともなって、極めて繊細な量子状態を制御・観測することが可能になってきた。そうした技術は量子光学・量子測定などの分野における量子力学とその多体効果の更なる深い理解や、量子情報・スピントロニクスなど、マイクロ世界の非自明な性質を応用していく方向性にも道を拓くものである。こうした分野における最大の障壁は、所望の状態を破壊してしまう外部環境とのカップリングに伴う散逸やデコヒーレンスである。繊細な量子状態の破壊に対しては、例えば量子誤り訂正、トポロジカル量子相の利用 [1] といった様々な対策やアイデアが提案されてきている。一方でこうした散逸の効果をポジティブに活用する道も模索されている [2,3]。また実験の方面では冷却原子系や量子光学系での技術の格段の進歩により、こうした散逸やデコヒーレンスを伴うモデルを、人工的に実現・制御 [4] することが可能になってきている。その結果新しい量子相の発見や、理論との比較進展が加速している領域である。

重要性の高まる散逸やデコヒーレンスの効果を議論すべく、外部環境とそのカップリングを考慮したモデルを孤立量子系とは対照的に開放量子系と呼ぶ。そこでは一般に量子状態は波動関数から密度行列によって指定され、時間発展は Hamiltonian 演算子から、密度行列に作用する Liouvillian 演算子となる。外部環境とのカップリングの結果、非平衡系特有の現象や性質が現れるのも特徴的である。

本発表では特に散逸の結果生じる開放量子系ならではの量子相や、相転移現象 [5,6] を紹介する。さらに平衡系や熱・統計力学での相転移・臨界現象の枠内での豊穡な理論と対比させるといふ本研究のアプローチについても可能な限り説明していくつもりである。

[1] J.K.Pachos and Steven H Simon *New J. Phys.* 16 065003 (2014)

[2] F.Verstraete *et al.*, *Nature Physics* 5, 633 - 636 (2009)

[3] S.Diehl *et al.*, *Nature Physics* 4, 878 - 883 (2008)

[4] K.Baumann *et al.*, *Nature* 464, 1301—1306 (2010)

[5] E.M.Kessler *et al.*, *Phys. Rev. A* 86, 012116 (2012)

[6] B.Horstmann *et al.*, *Phys. Rev. A* 87, 012108 (2013)

PS-64

自律デーモンに潜む階層性 —ひとりでできるもん！—

東京大学総合文化研究科 相関基礎科学系
松本拓巳

The hierarchy of autonomous demons —The demon can do information processing alone— Department of basic science, The University of Tokyo Takumi Matsumoto

Keywords : 情報熱力学, 非平衡統計力学, Maxwell の悪魔, Information thermodynamics, Non-equilibrium statistical mechanics, Maxwell's Demon

測定によってシステムに関する“情報”を得て, その“情報”を使用することによってシステムから仕事を獲得する. そのような測定とフィードバックを行うものを「デーモン」という. そのような状況を想定した理論体系として「情報熱力学」がある. これは当初, 測定とフィードバックが外部から制御されている系が考えられてきた [1]. では, 外部からの制御がない場合はどうなるのだろう. つまり,

「自律的に状態を測定し, フィードバックするような系の情報熱力学はどのようになるか」

これはデーモンが外部の制御などに頼らず「ひとりでできるもん！」と言っているような状況である(?) ことから「自律デーモン」と呼ばれ, このような機構は生体内を代表した様々な所で見られることから“物理”を超えた方面からも発展が期待されている.

自律デーモンに対するシンプルなモデルとして, 大きく分けて3つのモデル—8状態モデル, 4状態モデル, 2状態モデル—が考えられている. これらのモデルからはそれぞれ別の形の第二法則が得られ, その違いは各モデルで現れる“相互情報量”の形に起因する.

では, 「各々の相互情報量はどのような対応関係にあるのだろうか?」「そもそもまったく関係のない別のモデルなのだろうか?」そういった疑問を解決するべく本発表では, 近年導出された遷移指定型のゆらぎの定理にあたる Shiraishi-Sagawa 関係式 [2] を用いて, 8状態モデルから4状態モデル [3], 4状態モデルから2状態モデル [4] へと適切に縮約し, これらのモデルの相互関係を明らかにした上で, 自律デーモンの階層性を見出す.

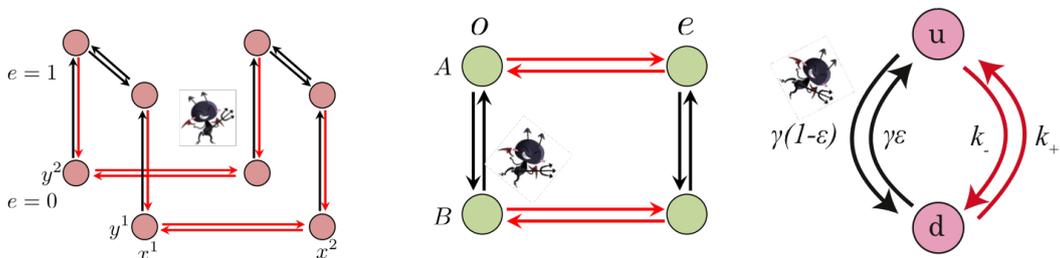


図 1: 状態空間で表した自律デーモンのモデル. 左から 8 状態モデル, 4 状態モデル, 2 状態モデル.

[1] T. Sagawa and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **104**, 090602 (2010). [2] N. Shiraishi and T. Sagawa, Phys. Rev. E **91**, 012130 (2015). [3] N. Shiraishi, S. Ito, K. Kawaguchi, and T. Sagawa, New J. Phys. **17**, 045012 (2015) [4] T. Matsumoto *et. al.*, to be submitted to New J. Phys.

微小な量子熱統計力学的機械のプロトタイプ

東大総合文化
 畠山遼子, 清水明

A prototype of minute Quantum Thermodynamic Machine
Dept. Basic Sci., Univ. Tokyo
 Ryoko HATAKEYAMA and Akira SHIMIZU

Keywords : 量子機械

微小な系であっても、数十自由度の量子系であれば、複雑な挙動を示す系を設計可能であると期待できる。量子効果が顕著でありながら、状態数が大きく熱統計力学的要素も含むためである。しかし、先行研究における微小機械は、その自由度の数から図1のように三つに大別でき、これら要素のいずれかが欠如していた。そこで本研究では、量子効果とエネルギーとエントロピーの競合によって何らかの機能を有するような数十自由度系を設計することを目指す。また、特定の機能を、できるだけ少ない自由度で実現するにはどうすればよいかも考察する。

本発表では、微小な量子熱統計力学的機械のプロトタイプとして、以下二つの系を紹介する。これらの系の解析には、負符号問題等が出ない新しい数値計算手法である、TPQ形式 [1] を用いた。

異なる温度領域で異なるサイトに粒子が偏在する系は、温度を変えると表示が変わるディスプレイと見なすことができる。我々は、扇形の部分系を環状に繋げた格子系において、温度変化に伴い、粒子数密度が二通りに偏在することを見出した。また、二通りのパターンを見るのに必要なサイト数は、十数自由度程度まで減らすことができる。このプロトタイプは、改良を加えることで、簡単な記号を表示する系の設計も可能であることを示唆する。

二つ目は微小なハードウェア四則演算器のプロトタイプである。粒子間相互作用はできるが粒子は通さない壁で系を三分割し、左右の領域の粒子数を入力とした二項演算の結果を、中央の領域にパターンとして出力する系を設計することが目標である。そのプロトタイプにおいて、左右の入力を反映していると思われる粒子数密度のパターンを見ることができたが、未だどのような演算結果を示しているかは明らかではない。

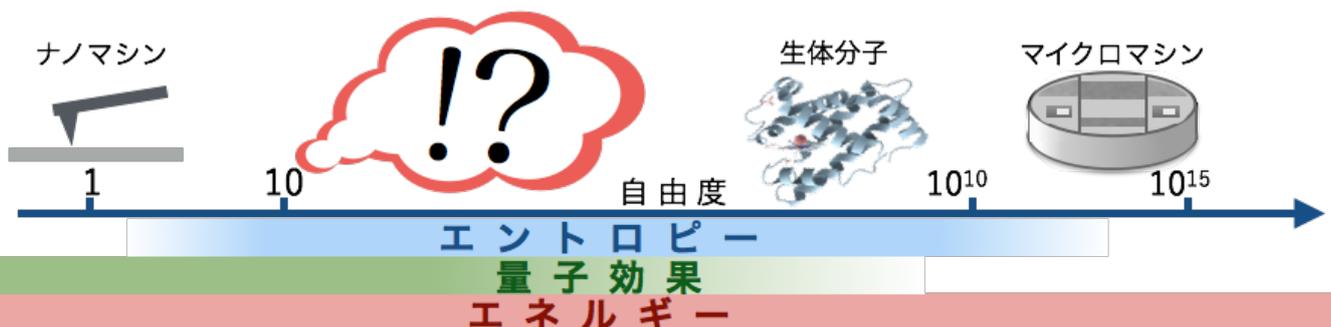


図 1: 微小機械とその自由度

[1] S. Sugiura and A. Shimizu, Phys. Rev. Lett. **111**, 010401 (2013).

対向する自己駆動粒子系におけるレーン形成過程の解明

新潟大学大学院自然科学研究科

池田光佑, 金鋼

Lane formation of oppositely self driven particles

Dept. Physics, Niigata Univ.

Kosuke Ikeda and Kang Kim

Keywords : 自己駆動系 協調運動 分子動力学シミュレーション

街中や駅の雑踏で歩行者の動きは周りの状況に応じて様々な振る舞いをしている。例えば、極端に狭い通路では流れが遅くなり、通路の途中に扉があると流れの方向が交互に入れ替わる。このような歩行者間での協調的な運動は、特に周りにいる歩行者の数が増えることと現れることは日常生活において経験的に知っているが、その背後に何らかのメカニズムが存在しているのであろうか？当然ながら歩行者の運動は少なからず人間の感情が関係しているはずである。しかしながら、人間を物体とみなし、物体が与えられたルールに従って運動していると考えれば物理学的な手法を用いて調べることができるであろう [1]。

本研究では文献 [2] に基づいて、歩行者を一定方向 (x 軸方向) へ最適速度 $\pm V_0$ になるように駆動されるブラウン粒子としてモデル化しシミュレーションを行った。そこで、無秩序に進行していた歩行者があるパラメータで秩序化したレーンを形成したり、同一方向に駆動されている歩行者同士でクラスターを形成することを見出した。ここで、レーン形成とは同一方向に駆動されている粒子が整列することであり、さらに、レーン形成率と輸送効率を定量化することによってレーン形成の過程と条件を特定し、歩行者流れの運動の背後にある物理的なメカニズムを理解することを目指した。

駆動力の大きさを決める最適速度とレーン形成を促進する異方的な散逸をもとにシミュレーション結果を定量化すると、系の状態が無秩序相、レーン形成相、クラスター相の3相の領域からなっていることがわかった。この結果は最適速度、異方的な散逸という2つの効果の競合により対向する自己駆動粒子のレーン形成という協調運動をもたらしているものと考えられる。さらに、密度依存性について詳細に解析した。密度によってレーンを形成するパラメータ領域が大きく異なり、低密度ほどレーン形成しやすいという結果となった。また、高密度では形成されるレーンの本数が正方向、負方向に駆動される粒子のそれぞれ1本ずつであるのに対して、低密度ではそれぞれ2本以上の複数レーンが生じることがわかった。この結果は、密度が自己駆動粒子系の協調運動の形成に与える大きな影響を示している [3]。

[1] D. Helbing, “Traffic and related self-driven many-particle systems”, *Rev. Mod. Phys.* **73**, 1067 (2001).

[2] M. Ikeda, H. Wada and H. Hayakawa, “Instabilities and turbulence-like dynamics in an oppositely driven binary particle mixture”, *EPL* **99**, 68005 (2012).

[3] K. Ikeda and K. Kim, in preparation.

電子対を用いた電子状態の計算手法

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻

川崎 愛理

Keywords: BCS, geminal

多体の波動関数を解くにあたって、1電子軌道を使わずに geminal (電子対) を用い、高精度な電子状態計算をする研究が注目をあびている[1][2]。

BCS タイプの波動関数を試行関数とし、より計算しやすい形にした Onishi, Yoshida の公式 [3]を用いて基底を多数用意して計算をしていく。

2 サイト 2 電子の場合は 1 電子軌道のとおりになるので、4 サイト 4 電子以上にしてみたときに geminal による効果はどんなものか議論していく。

また、幾何学状の違い、例えばチェーン状、正四面体状など、でどのような違いが見られるかについても議論する。

電子数を増やしていくほど geminal による効果が多く出ると考えられるので、そういった内容についても発表する予定である。

[1] A. J. Coleman, J. Math. Phys. 6, 1425 (1965).

[2] J. G. Valatin, Phys. Rev. 122, 1012 (1961).

[3] N. Onishi and S. Yoshida, Nucl. Phys, 80, 367 (1966).

Kitaev モデルの状態空間

東大総合文化

越田真史

State space of Kitaev model

Department of Basic Science, The University of Tokyo

Shinji Koshida

Keywords : Kitaev model, spin liquid, topological quantum computation

Kitaev の honey-comb モデル (Kitaev モデル) は [1] で導入された、「厳密に解ける」量子スピン系のモデルである。このモデルはパラメータを特殊化することで、トポロジカル量子計算における Kitaev toric code [2] になることから、topologically ordered state として興味を持たれている。また、[3] で示されたように、Kitaev モデルは基底状態がスピン液体状態となる例でもあり、この観点から、高次元への拡張 [4] や、有限温度の効果 [5] などの研究が活発に行われている。

さて、Kitaev モデルは「厳密に解ける」とされているが、その解き方は各サイトの Hilbert 空間を広げて、 \mathbb{Z}_2 ゲージ場に結合した tight-binding モデルにしたあとに固有状態を物理的な部分空間に射影するというものである。しかし、一般には線形独立なベクトルを部分空間に射影したものは線形独立ではない。つまり、tight-binding モデルの線形独立な固有状態たちが、物理的な部分空間において線形独立であることは保証のないことであり、したがって、tight-binding のスペクトルがそのまま Kitaev モデルのスペクトルに含まれるのかは非自明である（し、一般にはそれは成り立たないはずである）。またパラメータを特殊化して toric code が得られるなら、トポロジカルに保護された基底状態の縮退があることが予想されるが、その構造も明らかではない。

一方で、有限温度の効果調べるときなど、どのセクターたちが縮退しているかや各セクターにどのような励起状態があるかといった状態空間の構造を知る必要がある場面は多い。

このような背景のもと、本研究では Kitaev モデルの状態空間の構造を把握することを目標とする。その最初のステップとして、 \mathbb{Z}_2 ゲージ場の各配位のセクターで tight-binding の固有状態が得られたときに、どの固有状態が物理的なスペクトルに含まれるかの選択則を明らかにする。そのために、 \mathbb{Z}_2 ゲージ場の配位を固定したセクターから物理的な部分空間への射影の核 (kernel) を考え、それを \mathbb{Z}_2 ゲージ場の配位と、tight-binding を対角化する 1 粒子状態の励起の数によって特徴付けた。

[1] A. Kitaev, *Ann. Phys.* **321**, 2 (2006).

[2] A. Kitaev, *Russian Math. Surveys* **52**, 1191 (1997).

[3] G. Baskaran *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 247201 (2007).

[4] S. Mandal *et al.*, *Phys. Rev. B* **79**, 024426 (2009).

[5] J. Nasu *et al.*, *Phys. Rev. B* **89**, 115125 (2014).

流動誘起不安定化現象における固体境界壁の影響

東京大学 生産技術研究所

黒谷 雄司, 古川 亮 and 田中 肇

Effect of boundary walls on flow-induced instability
Institute of Industrial Science, University of Tokyo
Yuji Kurotani, Akira Furukawa and Hajime Tanaka

Keywords : 不安定化, Navier-Stokes 流体, instability, Navier-Stokes fluid

1成分からなる均一な圧縮性 Navier-Stokes 流体に対して単純せん断流れ (Couette 流) を印加した場合を考える。このとき, もし粘性率の圧力微係数 $\eta'(p)$ が 0 でないならば, せん断率 $\dot{\gamma}$ が臨界せん断率 $\dot{\gamma}_c = \eta'(p)^{-1}$ を超えたとき流体の密度分布が自発的に不均一化することが知られている [1]。直観的には体積変化を誘起しないはずのせん断変形でも密度不安定化が起こるのは, 流体の連続の式を通じて密度とせん断率が couple するためである。本機構による不安定化は, $\eta'(p)$ が大きくなり得る高粘性液体や気液臨界点近くの液体において重要な機構と考える事が出来る。また, Upper-convected Maxwell model に従う線形粘弾性体でも類似の機構で不安定化が起こることが知られている [2]。

しかしながら, 上記の議論では系にせん断流れを印加する固体境界壁の影響が明示的に考慮されていない。固体壁が存在すると, 固体壁上で流体速度が 0 になるという no-slip 境界条件と, 壁と流体間の表面相互作用 (表面エネルギー) の考慮が必要のため, その不安定化機構や臨界せん断率は大きく変わると予測される。特に, no-slip 境界条件のみを考慮した場合, 臨界せん断率は大きくなり (つまり不安定化が起こりづらくなり), また壁近傍で局所的に密度が不安定化するモードが存在することが解析的に示されている [3]。

本発表では, 臨界点近傍の van der Waals 液体に対して固体壁を考慮したシミュレーションを実施し, 上記の不安定化の様子を調べた結果を述べる。特に, 表面相互作用を考慮しない場合, シミュレーションにより得られた不安定化の臨界せん断率は理論予測 [4] とよく一致する事を確認した。また, 壁と流体間の表面相互作用を斥力的にすると, より小さい臨界せん断率で流体が不安定化する事が分かった。

[1] A. Furukawa and H. Tanaka, *Nature (London)* **443**, 434 (2006).[2] A. Furukawa and H. Tanaka, *Nature Mater.* **8**, 601 (2009).[3] V. Steinberg *et. al.*, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 254502 (2008).

誘電分光法による Poly(ethylene glycol) 水溶液の不凍水の 2 度の融解

東海大学大学院総合理工学研究科 宮良 政彦

Keywords:高分子、水、誘電緩和

【研究背景】

誘電分光法による部分的に氷結した水のダイナミクスの研究は、PVP, PEI, PVME, PVA を溶質とした高分子水溶液で行われてきた[1]。これら高分子水溶液の水の凝固点 T_c 以下では、水が部分的に氷結し、それ以外の部分の水は凍ることなく不凍水となり、不凍溶液相と呼ばれる液相を保つことが確かめられている。本研究では、上で挙げた高分子とは化学構造が異なる PEG という高分子を用いて、その不凍水の特徴を調べた。PEG は、これまでに Differential Scanning Calorimetry (DSC)測定で研究されてきた。DSC 測定における PEG 水溶液の融解現象の研究では、分子量が 900 未満の PEG の水溶液では融解が 1 度確認され、分子量が 900 以上の PEG の水溶液では融解が 2 度確認されている。この現象については、PEG 水溶液中に他の水と異なる水があり、それに起因するためと考えられているが、はっきりとは分かっていない[2],[3],[4]。本研究の目的は、誘電分光法を用いて PEG 水溶液中の不凍水の誘電緩和を観測することで、不凍水の 2 度の融解現象のメカニズムを明らかにすることである。

【実験】

PEG (和光純薬工業社製, 分子量 8,000 g/mol)を純水と混ぜ、PEG 濃度 10 – 50 wt%の水溶液を調製した。誘電分光法により、213 – 298 Kにおける PEG 水溶液の複素誘電率の測定を 40 Hz – 50 GHz の周波数域で行った。誘電率測定には、Impedance Analyzer (Agilent 社製, 4294A)、Impedance/Material Analyzer (HEWLETT PACKERD 社製, 4291A)、Vector Network Analyzer (Agilent 社製, N5230C) の 3 つの装置を用いた。

【結果および考察】

全ての PEG 水溶液で不凍水の誘電緩和が観測された。図 1 に、10 – 50 wt%PEG 水溶液の水の緩和強度 ($\Delta\epsilon$)の温度依存性を示す。 $\Delta\epsilon$ の温度依存性からは、温度の上昇とともに、氷が融解することで $\Delta\epsilon$ が増加することが分かる。また低温側の融解(1 度目の融解)は、PEG 濃度に依存せずに一定の温度で融解が始める。一方、高温側の融解(2 度目の融解)は、融解の終わる温度が PEG 濃度によって異なる。低温側の融解の温度域において、PEG 濃度に依存しなくなるのは、不凍溶液相での PEG 濃度が全ての PEG 水溶液で高く一定になるためと考えられる。これらの結果から、PEG 水溶液の低温側の融解は PEG 近傍の特殊な構造の水分子によるもので、高温側の融解は他の高分子水溶液の氷結した状態の水と同じ性質の水であることが分かった。この詳細は、本ポスター発表で説明する。

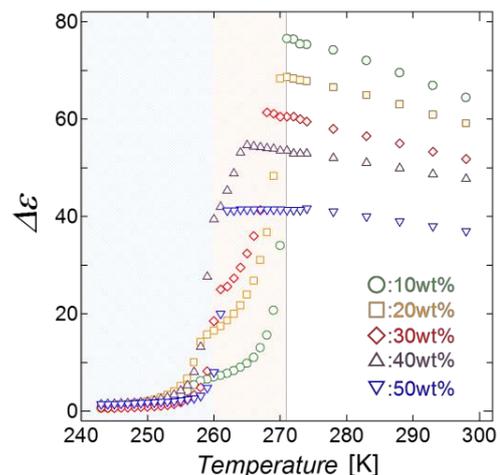


図 1. 10-50wt%PEG 水溶液の水の緩和強度の温度依存性。

[1] N. Shinyashiki, *et al.*, J. Phys. Chem. B **111**, 10079-10087 (2007).

[2] M. Shimomura, *et al.*, Reports on Progress in Polymer Physics in Japan, **41** (1998).

[3] M. Shimomura, *et al.*, Reports on Progress in Polymer Physics in Japan, **42** (1999).

[4] L. Huang, *et al.*, Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, **39**, 496-506 (2001).

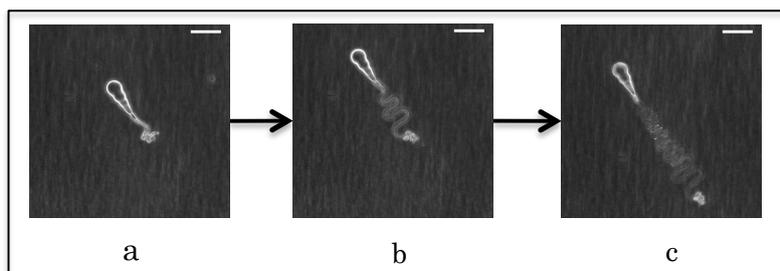
化学刺激による分子集合体の自己駆動現象

東北大学大学院理学研究科^A, 東京大学大学院総合文化研究科^B諸橋 博昭^A, 豊田 太郎^B, 今井 正幸^A

Self-Propelling of molecular aggregates by chemical stimuli

*Dept. of Physics, Graduate School of Science, Tohoku University^A**Dept. of Basic Science, Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo^B*Hiroaki Morohashi^A, Taro Toyota^B and Masayuki Imai^A**Keywords: アクティブマター, 脂質二重膜 Active-matter, Lipid bilayer**

我々は生物に独特な特徴の一つとして、「自発的な運動」が挙げられると考えている。生物の自発運動は、化学反応による分子の変化の集団的な挙動により自身の形を変形させ、その変形と周囲との摩擦(基板との摩擦や流体の粘性抵抗)によって推進力を得ており、これはほとんどの生物に関して共通である。そこで我々は、素性の分かっている分子で構成され、より単純な構造を持った分子集合体を用いて、この運動を人工的に作り出し生物の自発運動を再現することを目指した。ここで対象とする生物とは、鞭毛という、構造が比較的単純でありながら洗練された機構で自発運動を実現している微生物(ミドリムシなど)である。我々はPOPCというリン脂質の分子集合体が界面活性剤で容易に形態変化する現象に注目した。リン脂質は一分子中に親水基と疎水基の両方を持ち、水中で自己集合し二分子膜を形成する。この二分子膜が多層に積み重なったもの(Multi-lamellar-vesicle ;MLV)を作製し、そこに界面活性剤(TritonX-100)を加えた。リン脂質分子集合体が界面活性剤溶液中で溶解する過程で、紐状構造体の形成、さらにその紐状構造体が左右に大きく波打ち(フラッピング)、分子集合体自身が一方向的に駆動するというダイナミックな現象が観察された(図1)。今回の発表では上記のダイナミクス of 明視野顕微鏡観察、変形時の内部構造変化の偏光顕微鏡観察の各実験結果を示し、そこから導ける紐状構造体の形成についての考察を述べる。また、水中の鞭毛虫の運動を流体力学的に解析した先行研究[1]に基づいて、紐状構造体のフラッピングによって発生した駆動現象について議論する。

図1; POPC分子集合体の位相差顕微鏡画像(scale bar=50 μ m)

a~c まで 17 秒

[1] C. Brennen *et al.*, *Ann. Rev. Fluid. Mech.*, **9**, 339 (1977)

1 次元における拡散について

名古屋大学理学研究科物質理学専攻 R 研
梶谷 壮輝

Single-File Diffusion

R laboratory, Division of Material Science, Graduate School of Science,

Nagoya University

Masaki Kajitani

Keywords: 1 次元, 拡散, SFD,

ブラウン運動する粒子のような通常の粒子の拡散では、平均二乗変位は時間に比例する。しかし、1次元で粒子が剛体球の場合は SFD(Single-File Diffusion)と呼ばれ、粒子が隣の粒子を追い越すことができないため渋滞が起こり、通常よりも拡散が遅くなる。このときの平均二乗変位は時間の $1/2$ 乗に比例することが知られている[1]。

私は分子動力学法の一つであるブラウン動力学法を用いて 1 次元の粒子の拡散をシミュレーションした。なお、粒子間には Soft Core ポテンシャルによる相互作用がはたらくとした。

その結果、平均二乗変位は時間の $1/2$ 乗に比例することが確かめられた。その上で、捕捉粒子に微小な力を加えた際の動力学について議論するつもりである。

[1] Henk van Beijeren, K. W. Kehr and R. Kutner, Phys. Rev. B **28**, 5711 (1983)

[2] K. W. Kehr, J. Stat. Phys. **30**, 509 (1983)

[3] S. Alexander and P. Pincus, Phys. Rev. B **18**, 2011 (1978)

[4] L. Lizana and T. Ambjörnsson, Phys. Rev. Lett. **100**, 200601 (2008)

鋸歯状電場によるマイクロ粒子の集団運動

東工大・院・総合理工^A
早川雅之^A, 瀧ノ上正浩^A

Collective motion of microparticle under the sawtooth-shaped electric field

^A*Interdisciplinary Grad. Sch. Sci. and Eng. Tokyo Tech.*

Masayuki Hayakawa^A and Masahiro Takinoue^A

Keywords: Collective motion, Active matter

近年、非平衡物理やソフトマター物理など、様々な分野からアクティブマターに関する研究が注目を集めている。アクティブマターとは、自由エネルギーを駆動力に変換しながら運動する個体から形成される集団と定義され[1, 2]、特に近年では、個体同士のローカルな相互作用により生じる、方向性を持った系全体の運動が数多く報告されている。このような自発的に生じる集団運動は、魚や鳥の群れ、細胞の集団運動の理解だけでなく、微小構造体や分子などを輸送する原理構築などにもつながる。一般的に、個体の運動の方向性は、物体自体の異方性、または、作用させる外力の異方性により生じさせることが出来るが、近年報告されている研究の多くは、鞭毛やヤヌス粒子など、異方性を持つ物体を用いたものに集中している。したがって、アクティブマターにおける異方的な外力場の効果を解明することで、集団運動の理解や、新たな輸送原理構築の発展を促進することが期待できる。

我々は、異方性を持つ外力場として鋸歯状電場を形成し、それにより駆動するポリスチレンマイクロビーズ集団の観察を行った。電極間におかれたビーズは、不均一な電場による誘電泳動力と静電気力により運動することがわかった。さらにビーズの密度に応じてその運動パターンが変化していく様子が確認され、ある密度ではビーズ集団が一方向へ集団輸送される様子が観察された。本発表では、密度により変化するビーズ集団運動について報告し、その原理について考察を行う。我々は、この現象により、自然界に存在する集団運動の理解や、微小構造体の輸送原理の発展が促進されると考えている。

[1] S.Ramaswamy, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* 1, 323 (2010).

[2] M. C. Marchetti et al, *Rev. Mod. Phys.* 85, 1143 (2013).

PS-74

非協力ゲームにおける階層の発生

藤本悠雅

東京大学大学院総合文化研究科

Keywords : ゲーム理論、階層性、囚人のジレンマ

分子が細胞を、その細胞が生物を、その生物が群れを構成するように、階層構造は自然界で頻繁に見られるものである。ゲーム理論の観点からは、階層構造を踏まえた上での囚人のジレンマゲームが先行研究されている。ここでは、同じ個体が同じ数で集団を構成するという、限られた階層構造しか考えられていなかった。同じ個体を仮定しても、違う個体数の集団間でゲームを行うことや、それを踏まえて個体の利得を元に集団構成(各集団にどのくらいの数の個体が属するか)が変化することはここでは議論されていなかった。この研究では、前半で個人が集団を組んで集団同士で争うゲームから各個人の利得を定め、後半でそれを仮定した上でどのような集団構成が安定になるかを議論する。

前半では集団構成が与えられたときに、次のようなゲームを行う。(図1) 集団 i の個体 j が x_{ij} のコストを支払い、集団毎のコストの合計と人数を使って共通の資材を奪い合う。集団毎に得られた資材は集団内で平等に分け、そこから個体が始めに支払ったコストを引いたものを利得 u_{ij} とする。このゲームは、コストを支払わないと得られる利得は減るが、支払いすぎると同じ集団の人にフリーライドされてしまうジレンマゲームになっている。また、集団の資材の奪い合いにおいて大集団の相対的な有利度 α を導入している。全ての i, j についての Nash 均衡を安定解とし、これによって任意の集団構成と大集団有利度が与えられたときの各個体の利得が定まる。これを踏まえた上で、後半では個体が自己利益を上げるために属する集団を変化させていく次のようなゲームを考える。まずランダムに2つの個体を選ぶ。違う集団間の個人は双方の合意で、相手を自分の集団に入れるか、その逆か、現状維持かのどれかを実行する。同じ集団間の個人は双方の合意で、相手を集団から追放するか、現状維持かのどれかを実行する。これを集団構成が安定になるまで繰り返す。

当日は、前半で大集団有利度や集団構成を変化させたときの Nash 均衡での利得を、後半で大集団有利度を変化させたときに安定な集団構成の変化を議論する。

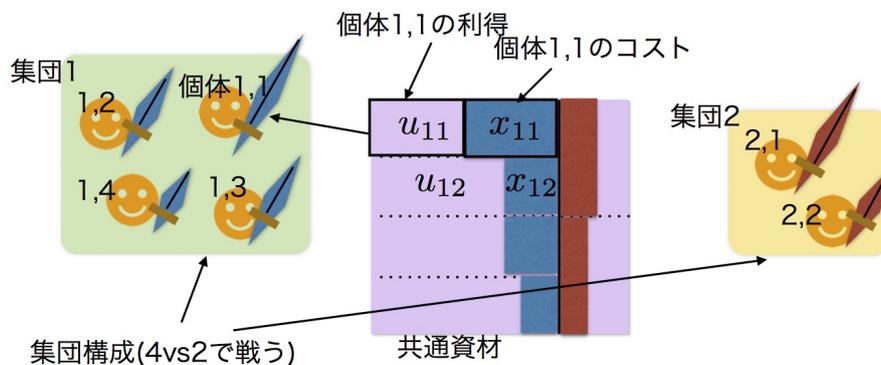


図 1: 前半のゲームの模式図

光格子中の超流動ボース気体における Nambu-Goldstone モードと Higgs モードの減衰

京大基研
長尾一馬, 段下一平

Finite-temperature effects on damping of the Nambu-Goldstone and Higgs modes of superfluid Bose gases in optical lattices

Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University
Kazuma Nagao and Ippei Danshita

Keywords : Cold Atoms, Spontaneously Symmetry Breaking, Nambu-Goldstone and Higgs mode, Finite temperature effects

光格子中の超流動 Bose 原子気体を考える。系は超流動-Mott 絶縁体転移近傍で、かつ整数充填率であると仮定する。このとき系は粒子・正孔対称性を持ち、集団励起モードとして秩序変数の位相揺らぎに対応する Nambu-Goldstone (NG) モードと振幅揺らぎに対応する Higgs モードが存在する [1][2]。これらのモード間の相互作用に起因する各モードの減衰効果を有限温度において調べる。

実際の解析では Bose-Hubbard 模型から出発する。Bose-Hubbard 模型は光格子にトラップされた Bose 原子気体を記述する [3]。量子相転移点近傍で、かつ整数充填率であるとき、Bose-Hubbard 模型を単一イオン型異方性を持つ XY スピン 1 模型という有効模型で近似することができる [4]。この近似された模型に対して温度 Green's 関数の方法を適用することで有限温度における各モードの自己エネルギーを導出し、減衰率に対する表式を求める。計算は 1-loop、すなわち量子補正の最低次までの寄与を考慮して実行される。

長波長近似の範囲内においては、減衰率に対して簡単な解析的表式を導出することができる。その結果から、NG モードの減衰率が、与えられた温度において、オンサイト相互作用を超流動相から Mott 絶縁相へ近づけるにつれて、著しく増大することを示す。また、この現象の物理的背景が、Higgs モードギャップと系の温度との競合であることを示す。さらに、Higgs モードの減衰率も、同様に導くことができる。それが E. Altman と A. Auerbach による絶対零度における解析結果 [4] の有限温度補正を与えることを示す。また、数値的な手法を用いてより正確な減衰率の相互作用依存性を求める。

References

- [1] M. Endres et al., *Nature* **487**, 454 (2012).
- [2] D. Pekker and C. M. Varma, *Ann. Rev. of Cond. Matt. Phys.* **6**, 269 (2015)
- [3] I. Bloch et al., *Rev. Mod. Phys.* **80**, 885 (2008).
- [4] E. Altman and A. Auerbach, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 250404 (2002).

Active matter としての神経幹細胞

東京大学大学院 理学系研究科^A, Department of Systems Biology,
Harvard Medical School^B
上道雅仁^A, 川口喬吾^B, 佐野雅己^A

Keywords : アクティブマター, 集団運動, 細胞運動

方向性を持つ物体の多体系として、液晶がよく知られている。しかし、液体-液晶転移のように静的な現象はよく解析されているのに対して、各個が動く系となるとほとんど解っていないのが現状である。このような系は鳥や魚の群れに代表されることが多いが、中でも解析のしづらい中間程度のスケールを持つ神経幹細胞で実験をおこなった。

ユニバーサル断熱量子計算

マサチューセッツ工科大学

高木 隆司

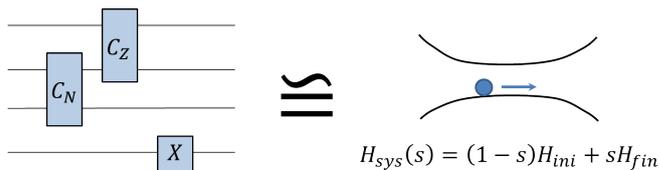
Universal Adiabatic Quantum Computation
Massachusetts Institute of Technology

Ryuji Takagi

Keywords : 量子情報, 断熱量子計算, 万能量子計算, Quantum Information, Adiabatic Quantum Computation, Universal Quantum Computation

物性物理学を含むあらゆる研究分野において数値シミュレーションは強力な研究手法であるが、多くの系では必要とされる計算量が膨大となり、現実的に遂行できないことも珍しくない。近年、量子力学を計算に応用し、従来よりも効率的に計算を遂行しようとする「量子計算」に大きな注目が集まっている。量子計算の遂行中は、コヒーレントな量子状態を常に維持しなければならないが、それは一般に非常に難しいが、その問題を解決する可能性があるものとして断熱量子計算 [1] は大きな注目を集めてきた。例えばあるハミルトニアン H_{fin} の基底状態を求めたいとしよう。そのために、基底状態が自明で H_{fin} と非可換なハミルトニアン H_{ini} を用意し、系のハミルトニアンを $H_{\text{sys}}(s) = (1-s)H_{\text{ini}} + sH_{\text{fin}}$, $0 \leq s \leq 1$ と定義する。ハミルトニアンは最初 $H_{\text{sys}}(0) = H_{\text{ini}}$ であり、 s をゆっくりと 0 から 1 に変化させることで徐々に H_{sys} を H_{fin} に向けて変化させていく。量子力学の断熱定理から、システムにギャップがある場合、初期状態を H_{ini} の基底状態に用意しておけば、ハミルトニアンを十分ゆっくり変化させることで終状態が自動的に H_{fin} の基底状態となることが保証される。いわば、物理系が勝手に計算をしてくれるのである。また、状態に次々とゲートを作用させていく回路型の量子計算とは異なり、断熱量子計算において状態はギャップのあるシステムの基底状態をたどっていくので、特定の外部からの擾乱に対して頑健であることが示されている [2]。

当初、断熱量子計算は組み合わせ最適化問題を効率よく解くアリゴリズムとして開発されたが、Aharonov らにより断熱量子計算と回路型の量子計算が同等の計算能力を持つことが明らかとなり [3]、以来いかにして断熱量子計算を計算可能ないかなる関数も計算できるユニバーサル量子計算として実現するかが研究対象となっている [4][5]。本発表では、断熱量子計算の誤り抑制および誤り訂正を議論し、ユニバーサル断熱量子計算の実現可能性を探る。



- [1] E. Farhi *et al.*, quant-ph/0001106 (2000), [2] M. Childs *et al.*, quant-ph/0108048 (2001), [3] D. Aharonov *et al.*, SIAM Rev., **50**, 755 (2008), [4] K. Young *et al.*, Phys. Rev. X, **3**, 041013 (2013), [5] A. Mizel, quantu-ph/1403.7694 (2014)

エキシトン超伝導の理論的予測

東京大学理学系研究科物理学専攻
宮藤 大輔

Theoretical Conjectures for Excitonic Superconductivity
Department of Physics, School of Science, The University of Tokyo
Daisuke Miyafuji

Keywords: エキシトン, 超伝導, Exciton, Superconductivity

1960年代に電子とホールが束縛状態になるエキシトンが提案^[1]、研究されてから50年が経ち、この間にエキシトンが起こす様々な現象が理論から研究された。エネルギーギャップが小さい半導体でエキシトンが凝縮するエキシトニック絶縁体(EI)もその一つである。強磁性などの秩序状態が崩れるときに超伝導が現れることから類推して、EIの秩序が崩れるときにも超伝導が現れるのではないかと近年推測されている(エキシトン超伝導)。

そして最近、EIの候補であるTa₂NiSe₅に圧力をかけると構造相転移の後に超伝導相が現れるという実験から、エキシトン超伝導の可能性が実験的に示唆された^[2]。構造相転移後がEIであるかはまだ明らかになってはいないが、この結果から近い将来エキシトン超伝導の研究が活発になると考えられる。

そこでこのポスターセッションでは、EIの相について今まで理論的に研究された論文をまとめる。そして、EIに関する知識からエキシトン超伝導に対するアプローチを考える。

[1] N. F. Mott, *Philos. Mag.* 6, 287 (1961)

[2] 松林和幸 2015年日本物理学会春季大会 22pBD-3

カイラル強弾性体 $\text{Ca}_2\text{Sr}(\text{C}_2\text{H}_5\text{CO}_2)_6$ における

結晶構造カイラリティに対する一軸圧印加効果

大阪大学 基礎工学研究科

上田 大貴, 木村 健太, 木村 剛

Stress-induced switching of crystal axes and chirality in ferroelastic chiral
crystal $\text{Ca}_2\text{Sr}(\text{C}_2\text{H}_5\text{CO}_2)_6$

*Division of Materials Physics, Graduated School of Engineering Science, Osaka
University*

Hiroki UEDA, Kenta KIMURA and Tsuyoshi KIMURA

Keywords: 物理, カイラリティ, Physics, Chirality

鏡に映さない限り重なることのない2種類の等価な構造が存在する性質、すなわち「掌性」の自由度を表すカイラリティという概念は、化学の分野において光学異性体の存在、またその生化学作用という点で古くから注目を集めてきた。固体物理学の分野においても、結晶構造及びそれに誘起される異常輸送現象の発現など、新奇な電子物性を生み出す秩序変数として、カイラリティが近年注目を集めている。本研究では、上述の非自明な磁気構造が発現する舞台となる結晶構造カイラリティそのものに着目し、固体結晶における結晶構造カイラリティを非自明な外場によって制御することを目的とした。

今回我々は、過去の報告[1]から $\text{Ca}_2\text{Sr}(\text{C}_2\text{H}_5\text{CO}_2)_6$ [空間群 $P4_12_12$ (or $P4_32_12$)]に着目し、一軸圧印加による結晶構造カイラリティの制御を試みた。本物質は室温において上記のカイラルな空間群に属しており、また同時に強弾性を示す。先行研究によると、[110]方向一軸圧印加によって現れる強弾性ドメインの結晶軸方位は元の結晶軸方位とは異なり、一軸圧を印加した方向が新たな[001]軸となる。それと同時にカイラリティを反映した偏光顕微鏡像のコントラストは、圧印加前と比べて反転（つまりカイラリティが反転）している。しかしこのカイラリティ制御機構の理解は未だ十分であるとは言えず、未解明のカイラリティ制御機構の解明によるカイラリティ制御可能物質群の拡充を目指すことが、本物質を研究対象とするモチベーションである。

水溶液蒸発法により育成した $\text{Ca}_2\text{Sr}(\text{C}_2\text{H}_5\text{CO}_2)_6$ 単結晶試料を種々の測定に適した形状に整形した後、偏光顕微鏡観察、旋光度測定等を行うことで、旋光方向ならびにそれに結合したカイラリティを決定した。同様の測定を一軸圧印加後にも行うことで、一軸圧印加前後におけるカイラリティ反転を示唆する結果を得た。我々はこの制御機構について、「強弾性ドメイン反転に伴う原子変位」をそれぞれのカイラリティについて計算し、カイラリティの反転が変位量及び変位方向に有意な差を生むことを突き止めた。本発表では実験結果を示すとともに、カイラリティ反転機構について詳細な考察を行う。

[1] A. Sawada, Y. Ishibashi, and Y. Takagi, J. Phys. Soc. Jpn. 43 (1977) 195