

—Condensed Matter Physics Summer School 60th—

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

第60回 物性若手夏の学校

分科会 概要集

岐阜県 ぎふ長良川温泉ホテルパーク
7月29日(水) 15:30-19:00

公演時間 招待講演 40分(発表30分、質疑応答10分)
一般講演 15分(発表10分、質疑応答5分)

招待講演にはタイトルの頭に”☆”が記入されています。

分野A (講義室：良光殿(5F))

A-1 ☆走査トンネル顕微鏡による遷移金属酸化物薄膜の電子状態イメージング
岡田 佳憲 東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 15:30-16:10

－休憩 15分－

座長：篠田 尚輝

A-2 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 16:25-16:40

A-3 強くp波相互作用するフェルミ気体の普遍的な関係式
吉田 周平 東京大学大学院 理学系研究科 16:45-17:00

A-4 銅酸化物高温超伝導体の軌道分解光電子分光
山神 光平 大阪大学大学院 基礎工学研究科 17:05-17:20

－休憩 15分－

座長：山神 光平

A-5 情報熱力学におけるOnsagerの相反関係
山本 峻平 東京大学大学院 総合文化研究科 17:35-17:50

A-6 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 大学院新領域創成科学研究科 17:55-18:10

A-7 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 18:15-18:30

A-8 恒常的な組織分化ダイナミクスの確率モデル
山口 裕樹 東京大学大学院 総合文化研究科 18:35-18:50

分野B (講義室：末広(4F))

B-1 ☆スピン流で観る物理現象
新見 康洋 大阪大学大学院 理学研究科 15:30-16:10

－休憩 15分－

座長：平出 泰輝

B-2 近藤半導体YbB₁₂のCa²⁺置換合金系の作成の試みとその磁化率
植松 直之 茨城大学大学院 理工学研究科 16:25-16:40

B-3 空間反転対称性が破れた強磁性体における非相反マグノン伝搬
井口 雄介 東京大学大学院 総合文化研究科 16:45-17:00

B-4 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 17:05-17:20

－休憩 15分－

座長：白井 彩香

B-5 マルチフェロイック物質h-(Lu_{0.5}Sc_{0.5})FeO₃の単結晶育成とその強的秩序ドメインの観測
鷲見 浩樹 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 17:35-17:50

B-6 CeNi₂Ge₂ とLaNi₂Ge₂ の3次元フェルミ面形状変化
中谷 泰博 大阪大学大学院 基礎工学研究科 17:55-18:10

B-7 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
石井 智大 京都大学大学院 理学研究科 18:15-18:30

分野C (講義室：慶賓殿(2F))

C-1	☆多軌道強相関電子系におけるエキゾチック超伝導		
	星野 晋太郎	東京大学大学院 総合文化研究科	15:30-16:10
	－休憩 15分－		

座長：國方 翔太

C-2	鉄系超伝導体FeSeにおける圧力下電子相図		
	松浦 康平	東京大学大学院 新領域創成科学研究科	16:25-16:40
C-3	鉄系超伝導体Fe(Se, S)における電子ネマティック相の研究		
	細井 優	東京大学大学院 新領域創成科学研究科	16:45-17:00
C-4	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	東京大学大学院 物性研究所	17:05-17:20
	－休憩 15分－		

座長：足立 景亮

C-5	層状物質におけるイオンゲート法による超伝導		
	中川 裕治	東京大学大学院 工学系研究科	17:35-17:50
C-6	軌道秩序を有する遷移金属ダイカルコゲナイドCrSe ₂ の走査トンネル分光		
	藤澤唯太	東京理科大学大学院 理学研究科	17:55-18:10
C-7	トンネルダイオード発振器を用いた精密磁場侵入長測定と超伝導ギャップ構造の決定		
	竹中 崇了	東京大学大学院 新領域創成科学研究科	18:15-18:30
C-8	超伝導体の渦糸格子状態における量子渦にかかる力の解析		
	須貝 駿貴	東京大学大学院 総合文化研究科	18:35-18:50

分野D (講義室：金(4F))

D-1	☆銅酸化物高温超伝導体の動的電子構造の数値計算		
	酒井 志朗	理化学研究所	15:30-16:10
	－休憩 15分－		

座長：沼倉 凌介

D-2	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つのフリーゲル振動の干渉現象		
	山村 諒祐	首都大学東京大学院 物理学専攻	16:25-16:40
D-3	Hofstadter's butterfly とその性質		
	吉岡 信行	東京大学大学院 理学系研究科	16:45-17:00
D-4	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	17:05-17:20
	－休憩 15分－		

座長：山村 諒祐

D-5	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	17:35-17:50
D-6	レーザー照射下の強相関トポロジカル絶縁体		
	高三 和晃	京都大学大学院 物理学・宇宙物理学専攻	17:55-18:10
D-7	グラフェン水素化原子欠損における近藤効果		
	森下 直樹	大阪大学大学院 基礎工学研究科	18:15-18:30

分野E (講義室：思い出(2F))

E-1	☆単純ガラスの熱容量からみるガラス転移の向こう側 辰巳 創一 京都工芸繊維大学 工学科学部	15:30-16:10
ー休憩 15分ー		

座長：森下 直樹

E-2	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	16:25-16:40
E-3	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	16:45-17:00
E-4	表面弾性波による量子状態の制御への試み 横井 雅彦 大阪大学大学院 理学研究科	17:05-17:20
ー休憩 15分ー		

座長：宮良 政彦

E-5	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	17:35-17:50
E-6	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	17:55-18:10
E-7	遷移金属カルコゲナイドを用いた円偏光発行トランジスタ 恩河 大 東京大学大学院 工学系研究科	18:15-18:30
E-8	Ferroelectricity in Atomically Thin MoS ₂ Studied From First Principles 李 智蓮 東京大学大学院 新領域創成科学研究科	18:35-18:50

分野F (講義室：華(4F))

F-1	☆大規模計算による非平衡研究の可能性 渡辺 宙志 東京大学 物性研究所	15:30-16:10
ー休憩 15分ー		

座長：濱本 敬大

F-2	一次元スピンレスフェルミオン模型における磁束クエンチ 中川 裕也 東京大学大学院 物性研究所	16:25-16:40
F-3	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	16:45-17:00
F-4	U(N)対称なフェルミオン系の超流動状態のNの偶奇性の違い 東川 翔 東京大学大学院 理学系研究科	17:05-17:20
ー休憩 15分ー		

座長：芳賀 大樹

F-5	孤立量子系の「平衡」への緩和とは？ 金子 和哉 東京大学大学院 総合文化研究科	17:35-17:50
F-6	どのくらい待てば あなたが 本当に判る 花里 太郎 慶應義塾大学大学院 理工学研究科	17:55-18:10
F-7	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	18:15-18:30
F-8	有機ディラック電子系 α -(BEDT-TTF) ₂ I ₃ について 吉村 健太 東京大学大学院 工学系研究科	18:35-18:50

A- 2

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)

強く p 波相互作用するフェルミ気体の普遍的な関係式

東大理^A, 理研 CEMS^B
吉田 周平^A, 上田 正仁^{A,B}

Universal relations in a strongly interacting p -wave Fermi gas

Dept. of Physics, UTokyo^A, RIKEN CEMS^B
Shuhei M. Yoshida^A and Masahito Ueda^B

Keywords : 普遍的な関係式, 冷却原子気体, フェルミ気体

低温・希薄・強相関な気体において、相関関数の高運動量・高周波数領域における漸近的な振る舞いが普遍的なベキを持つこと、そのベキに掛かる係数が系の熱力学量と普遍的な関係を持つことが知られている。これらの関係式は、相互作用の詳細に依らず、多体系でも少数系でも、基底状態でも有限温度でも、常流動相でも超流動相でも成り立つ、希薄気体の持つ極めて普遍的な性質である。実験的にも、冷却原子気体を用いた多数の検証が存在し、原子核中においても関係式の成立を示唆する結果がある。これらの関係式の導出では、相互作用の実効的な強さを表す長さパラメータ a , 平均粒子間距離 l , 相互作用の到達距離 r_{int} の間にある、

$$a \gtrsim l \gg r_{\text{int}} \quad (1)$$

という大小関係が本質的である。この不等式のため、 l よりも短距離（またはフェルミ波数 k_F よりも高波数）、かつ、 r_{int} よりも長距離のスケーリング領域では、多体系の相関関数が低エネルギーの2体散乱で決まる普遍的なスケーリングを持つのである。普遍的な関係式は、最初にスピン $1/2$ の3次元フェルミ気体で導出され、その後、低次元、格子系、ボソン系等に拡張されてきた。これらの拡張に共通しているのは、2体相互作用が1パラメータ、 s 波散乱長によって特徴づけられるという仮定である。しかし、上述のスケール分離の議論は s 波散乱長による記述に依存しておらず、より広いクラスの相互作用に対しても普遍的な関係式の存在を示唆している。

本研究では、 s 波相互作用が禁止され、強く p 波相互作用するスピンレス・フェルミ気体の普遍的な関係式、具体的には、運動量分布やRFスペクトルの漸近形と、それらを熱力学と結びつける関係式を議論する。強い p 波相互作用は、 s 波散乱長による記述を超えた最もシンプルな相互作用の一つであり、冷却原子気体を用いた実験でも実現されている他、原子核物理でも重要な役割を果たす。これは、希薄気体の普遍的な関係式の理論研究において、 s 波相互作用を超えた新しいユニバーサリティ・クラスを開拓するものと言える。発表では、私達の結果を支持する、冷却原子気体を用いた最新の実験にも触れたい。

[1] Shuhei M. Yoshida and Masahito Ueda, arXiv:1505.00622 (2015).

銅酸化物高温超伝導体の軌道分解光電子分光

阪大基礎工^A, 摂南大理工^B, 立命館大理工^C, 理研/SPring-8^D, JASRI/SPring-8^E, 産総研^F, 阪大理^G
 山神 光平^A, 内免 翔^A, 金井 惟奈^A, 藤原 秀紀^A, 木須 孝幸^A, 東谷 篤志^{BD}, 今田 真^C, 門野 利治^C,
 玉作 賢治^D, 室 隆桂之^E, 矢橋 牧名^D, 石川 哲也^D, 永崎 洋^F, 宮坂 茂樹^G, 田島 節子^G, 関山 明^{AD}

Orbital-resolved Photoemission Spectroscopy for High- T_c Superconducting Cuprates

^AGrad.Sch. of Eng. Sci., Osaka Univ., ^BFacu. of Sci. and Eng., Setsunan Univ., ^CDepa. of Phy. Sci.,
 Ritsumeikan Univ. ^DSPring-8/Riken., ^EJASRI, SPring-8, ^FAIIST, ^GGrad. Sch. of Sci., Osaka Univ.

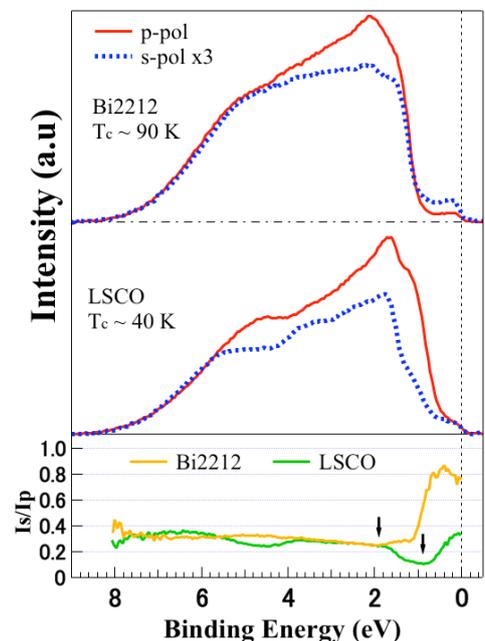
Kohei Yamagami^A, Sho Naimen^A, Yuina Kanai^A, Hidenori Fujiwara^A, Takayuki Kiss^A,
 Atsushi Higashiya^{BD}, Shin Imada^C, Toshiharu Kadono^C, Kenji Tamasaku^D, Takayuki Muro^E,
 Makina Yabashi^D, Tetsuya Ishikawa^D, Hiroshi Eisaki^F, Shigeki Miyasaka^G, Setsuko Tajima^G,
 Akira Sekiyama^G

Keywords: 高温超伝導体、光電子分光、Cu 3d 軌道対称性、直線偏光 X 線

銅酸化物高温超伝導体は伝導層: CuO₂ と絶縁層が交互に積層された結晶構造を持ち、Cu 3d 軌道と隣接する O 2p 軌道が混成する事で価電子帯バンドを形成する。特に軟 X 線吸収分光の実験結果からフェルミ準位(E_F) 近傍の電子状態およびフェルミ面は主に CuO₂ 面内の O 2p_y 軌道と混成している Cu 3d_{3z²-y²} 軌道によって形成されている¹⁾。一方で、ARPES の報告によると T_c とフェルミ面の関係について、 T_c が増加するにつれ、ひし形のフェルミ面から(π , π) を中心とする円弧へと湾曲していく関係が発見されている²⁾。最近、Two-Orbital 模型を用いた理論によると、この関係は Cu 3 軌道と頂点酸素の混成の強さに起因すると示唆しているが³⁾、フェルミ面は二次元的であり、c 軸方向に伸びる Cu 3d_{3z²-y²} 軌道の混成度合やその物質依存性の解明には実験的困難があった。

Cu 3d_{3z²-y²} 軌道成分の直接観測を目的に、我々は SPring-8 BL27SU にて $h\nu \sim 480$ eV の直線偏光軟 X 線エネルギー光を用いて単結晶: Pb_{0.6}-Bi_{1.4}Sr₂CaCu₂O_{8+x} (Bi2212: $T_c \sim 90$ K), La_{1.84}Sr_{0.16}CuO₄ (LSCO: $T_c \sim 40$ K) に対して価電子帯角度積分光電子分光測定を行った。その実験結果を右図に示す。両物質とも p 偏光配置(実線)と s 偏光配置(点線)で大きな線二色性が得られた。Cu 3d 軌道成分が支離的な光電子スペクトルであるかを評価するため、得られた光電子スペクトルにおいて p 偏光配置の光電子強度(I_p) に対する s 偏光配置のそれ(I_s) との強度比: I_s/I_p をプロットした。等方的な Cu 3d 軌道に対して今回の実験状況下における光電子強度比の計算値: $I_s/I_p \sim 0.31$ と同程度の分布を持っていることから、両物質ともに Cu 3d 軌道成分が支離的なスペクトルが得られていると示唆される。これにより E_F 近傍における I_s/I_p の違いは Cu 3d 軌道対称性由来であると考えられる。実験配置から E_F 近傍の I_s/I_p は 3d_{3z²-y²}/3d_{3z²-y²} の相対的な寄与を反映していることから LSCO が Bi2212 よりも Cu 3d_{3z²-y²} 軌道成分の混成度合が大きいことが明らかとなり、Two-Orbital 模型による理論結果と強く一致する。さらに Cu 3d_{3z²-y²} 軌道成分の準位は LSCO では ~ 1 eV、Bi2212 では ~ 2 eV に存在していると示唆される。

- 1) C. T. Chen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **68**, 2543 (1992).
- 2) X. J. Zhou *et al.*, Phys. Rev. Lett. **86**, 5578 (2001).
- 3) S. V. Borisenko *et al.*, Nature. **431**, 1-2 (2002).
- 4) H. Sakakibara *et al.*, Phys. Rev. B. **105**, 057003 (2010).



情報熱力学における Onsager の相反関係

東大総合文化^A, 東工大理工^B, 東大工^C山本峻平^A, 伊藤創祐^B, 沙川貴大^C

Onsager Reciprocity Relations in Information Thermodynamics

Dept. of Basic Sci. Univ. of Tokyo^A, Dept. of Phys. TokyoInst. of Tech.^B, Dept. of App. Phys. Univ. Tokyo^CShumpei Yamamoto^A, Sosuke Ito^B, and Takahiro Sagawa^C

Keywords : 情報熱力学、非平衡、線形不可逆過程

線形非平衡熱力学の理論によると、熱力学的力 (温度勾配等を一般化したもの) が $\{F_k\}$ であるような系には、熱力学的力に共役な流れ (熱流等を一般化したもの) $\{J_k\}$ が発生し、系のエントロピー生成率を σ とするとそれらは $\{F_k\}$ の線形の範囲で

$$\sigma = \sum_k J_k F_k, \quad J_k = \sum_m L_{km} F_m \quad (1)$$

と表される。磁場等の時間反転対称性を破る場が存在しないとき、一般に $L_{km} = L_{mk}$ が成立することが知られており、これを Onsager の相反関係という [1]。

一方、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 [2]。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。Bipartite Markov jump 系という、二つの熱力学的系 X, Y が連続時間・離散状態のマルコフ過程で記述され、それぞれが独立なノイズによってゆらぐような場合についての研究によると、二つの系が情報のみをやりとりする場合、部分系 X についての非平衡定常状態における情報を含んだ第二法則は

$$\sigma_X = \sigma_{rX} + \dot{I} \quad (2)$$

$$= \sum_k J_k^X F_k^X + \sum_k \tilde{J}_k F_k^I \geq 0 \quad (3)$$

となる [3]。ここで σ_{rX} は X に接触している浴のエントロピー生成率、 $\{F_k^X\}, \{J_k^X\}$ はその浴の間の熱力学的力とそれに共役な流れであり、 \dot{I} は Y から X への情報流、 $\{F_k^I\}, \{\tilde{J}_k\}$ は情報駆動力とそれに共役な確率流である。情報駆動力は通常熱力学的力との形式的類似性から [3] で提案されたものであり、その物理的意味は明らかではない。特に、通常熱力学的力と同様に相反関係が成り立つか否かは非自明な問題である。実際、通常熱力学的力については、相反関係は揺らぎの定理から直ちに証明できることが知られている [4] が、情報駆動力を含んだ場合には同様の方法では示すことはできない。

それにもかかわらず、我々は広いクラスにおいて、相反関係を解析的に証明することに成功した。今回はまず四状態モデルと呼ばれる最も単純な系について説明し、その後より一般的な状況についても証明の概略等を述べる。

[1] L. Onsager, Phys. Rev. **37**, 405 (1931)[2] JMR. Parrondo, JM. Horowitz, T. Sagawa, Nature Physics **17**, 045012(2015)[3] JM. Horowitz, M. Esposito, Phys. Rev. X **4**, 031015 (2014)[4] D. Andrieux, P. Gaspard, J. Chem. Phys. **121**, 6167 (2004)

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。

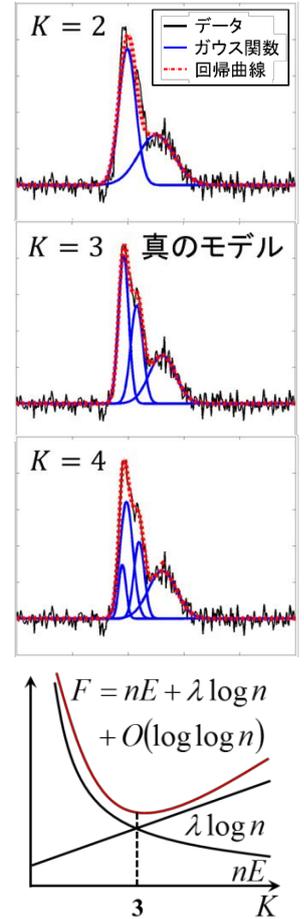


図1: ベイズ統計

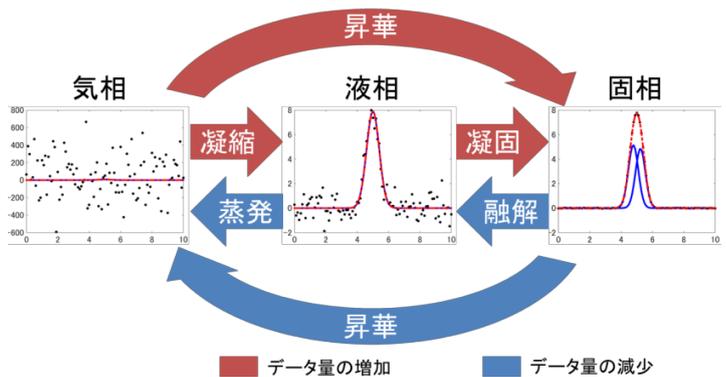


図2: ベイズ統計における相転移現象

[1] 渡辺澄夫, ベイズ統計の理論と方法, コロナ社, 2012.

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とき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だろうか？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.

恒常的な組織分化ダイナミクスの確率モデル

東大総合文化

山口裕樹

Stochastic Model of Homeostatic Dynamics in Tissue Differentiation

Department of Basic Science, Univ. Tokyo

Hiroki Yamaguchi

Keywords : 細胞分化, 恒常性, 確率過程

哺乳類の成体組織の恒常性は成体幹細胞によって維持されている。成体組織において幹細胞は自己複製と細胞分化を繰り返し、組織における細胞数を一定に保つ働きをもつ。これを組織の恒常性という。正常な組織において幹細胞がどのように恒常性を維持しているか、という問いは古くから多くの研究者の興味を引きつけてきた。

近年、幹細胞の恒常的な分化ダイナミクスを生体内 (*in vivo*) で実験的に追跡することが可能になってきており、恒常的な組織における幹細胞の運命決定のメカニズムに関する理解が進んでいる。例えば、上皮組織の幹細胞に低確率で蛍光蛋白が発現するような遺伝子改変マウスを作ることによって、上皮組織において蛍光蛋白によりラベルされた幹細胞のつくるパターンを観測することができる。実験的研究によって、ラベルされた幹細胞数の確率分布が動的スケーリング則に従うことが示された。この実験的発見は、単純な確率的分化ダイナミクスに従って幹細胞が常に入れ替わっていることを示唆しており、幹細胞の運命決定の問題に大きなパラダイムシフトをもたらした。また、この動的スケーリング則を説明する数理モデルが実験と同時に提案されて注目を集めている。

ところが、実験結果を説明するこれらの数理モデルは、組織の恒常性を表す「分化確率と自己複製確率の釣り合い」を a priori に仮定してしまっている。この仮定はモデルを単純にするため、実験で得られた動的スケーリング則を説明する際に重要な役割を果たす一方で、モデルのパラメータが Fine-tune されている状況を表しており、現実的でない。そこで我々は、幹細胞の分化ダイナミクスが局所的な幹細胞密度に依存して決まると仮定してモデルを構築し、幹細胞が密度依存的な相互作用を通して動的に恒常性を維持する描像を提案する。この密度依存的な分化ダイナミクスのモデルにより、これまでの理論を統一的に理解することができるだけでなく、これまで実験的に明らかにされてこなかった分化ダイナミクスの振る舞いへ一歩踏み込むことができると期待される。

[1] E. Clayton *et al.*, *Nature* **446**, 185-189, (2007).[2] A M. Klein and B D. Simons, *Development* **138**, 3103-3111 (2011).

B-2

近藤半導体 YbB_{12} の Ca^{2+} 置換合金系の作成の試みとその磁化率

茨大院理工^A

植松直之^A, 和田徹^A, 伊賀文俊^A

The Challenge to make $\text{Yb}_{1-x}\text{Ca}_x\text{B}_{12}$, and this susceptibility.

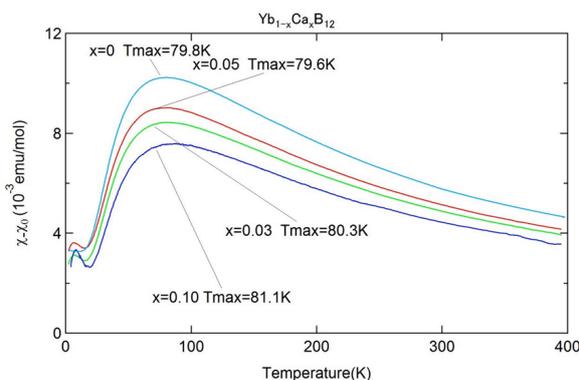
^A Grad. Sch. Sci. & Eng., Ibaraki Univ.

N. Uematsu^A, T. Wada^A, F. Iga^A

Keywords: YbB_{12} , Kondo insulator, 高圧合成

希土類十二硼化物の一つである YbB_{12} は 200K 程度のエネルギーギャップを持つ近藤半導体として知られているが、エネルギーギャップの形成機構は未だ詳しくわかっていない。そこで現在 YbB_{12} のエネルギーギャップの形成機構として主に二つのモデルが考えられている。一つが Yb の 4f 電子と 5d 電子バンドとの混成によりギャップが生じるとする c-f 混成ギャップモデル[1]で、もう一方は局在した 4f 電子と 5d 伝導電子が近藤効果により Kondo スピン 1 重項を形成しその励起状態のスピン 3 重項とのエネルギー差によるものだとする Kondo 1 重項局在モデル[2]である。今までにエネルギーギャップの形成機構を調べるために YbB_{12} の置換系 $\text{Yb}_{1-x}\text{R}_x\text{B}_{12}$ ($\text{R}=\text{Lu}^{3+}, \text{Sc}^{3+}, \text{Y}^{3+}, \text{Zr}^{4+}$) について研究された。3 価の置換系では 50 パーセント置換までエネルギーギャップの大きさにほとんど変化がなかったのに対して、4 価である Zr 置換系ではエネルギーギャップの大きさに相関があるとされる磁化率のピーク温度が x 増大とともに高温側に向かった。そこで我々は価数とエネルギーギャップの関係を調べるため、 YbB_{12} に RB_{12} 中で二価のイオンになると予想される Ca の置換系を、FZ 法や高圧合成法を用いて作製を試みた。

常圧下で焼成を試みた $\text{Yb}_{1-x}\text{Ca}_x\text{B}_{12}$ の磁化率の測定結果は、大きな磁化率のピーク温度の変化はなかったものの 20K 以下の磁化率がほぼ x に依らず一定なのに対し、磁化率の最大値が x によって減少するという結果を示した。x=0.05 で磁化率のピークの大きさが 10 パーセント程度減少していることから、この振る舞いは単なる希釈効果とは別のものであると考えられる。講演では以上の議論に加えて、ショートパルス磁化の実験結果も併せて議論する。



[1] Tetsuro Saso, and Hisatomo Harima J. Phys. Soc. Jpn. 72, pp. 1131-1137 (2003)

[2] S. H. Liu, PRB 63 (2001)115108.

B-3

空間反転対称性が破れた強磁性体における非相反マグノン伝搬

東京大学総合文化研究科

井口雄介、上村宗一郎、上野和紀、小野瀬佳文

Nonreciprocal magnon propagation in a noncentrosymmetric ferromagnet

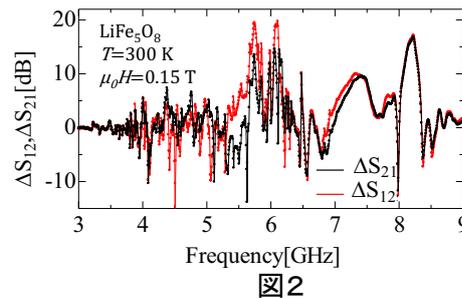
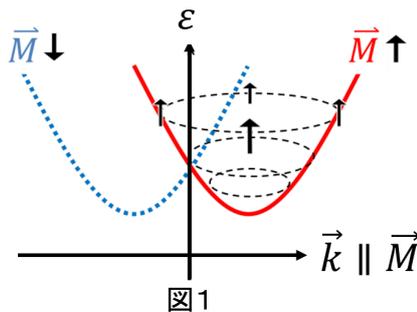
Department of Basic Science, University of Tokyo

Y. Iguchi, S. Uemura, K. Ueno, Y. Onose

Keywords : magnonics, Dzyaloshinskii-Moriya interaction, micro wave

1990年以降、巨大磁気抵抗効果の発見を皮切りに、電子の電荷とスピンの自由度を利用したスピントロニクスが、第二のエレクトロニクスとして急速に発展してきた。中でもスピンの輸送現象(スピン流)は基礎的にも応用的にも非常に興味深いトピックスであり、特にスピン流と物質中の相対論的効果(スピン軌道相互作用)について、電子のラシエバ分裂などいくつか興味深い研究が報告されている。ラシエバ分裂のような相対論効果による結晶対称性の影響はマグノンのバンド構造にも現れる。結晶の空間反転対称性が破れた強磁性体中のマグノンはDzyaloshinskii-Moriya(DM)相互作用(スピン軌道相互作用に起因した交換相互作用) $H_{DM} = \alpha \mathbf{M} \cdot (\nabla \times \mathbf{M})$ によって非対称なバンド分散を持つことが知られている [1](図1)。我々はこの非対称バンド由来のマイクロ波領域での非相反マグノン伝搬の観測に成功した [2]。

本研究で扱う LiFe_5O_8 は、 $T_c = 943\text{K}$ の強磁性体であり、空間群 $P4_132$ に属するキラルな(鏡映がない)結晶構造を持ち図1のような非対称マグノンバンドを持つ。このような非対称なマグノンバンドを持つ磁性体では、磁化方向に依存した異方的な群速度を持ったマグノン励起が期待される。だが、 $k \sim 0$ の領域では古典的な磁気双極子相互作用によってマグノンバンドが大きく対称に曲げられてしまい、この非対称性がほとんど観測できないことが研究を進める中で明らかになった。つまり、非対称マグノンバンドのマイクロ波領域での結合を観測するためには、高波数のマグノンを励起する必要がある。そこで、我々は高波数マイクロ波を試料に印加するために、フォトリソグラフィーを使用して μm スケールの微細加工したマイクロ波アンテナを作成し、マイクロ波応答を測定した。図2に示すように方向によってマイクロ波の透過信号が異なる非対称マグノンバンド由来の非相反なマイクロ波応答を観測した。本講演では、より詳細な実験結果を示し、DM 起源の非対称マグノンバンド由来の非相反なマイクロ波応答について明らかにする。



[1] M.Kataoka *JPSJ* 56, 3635 (1987). [2] Y.Iguchi *et al.*, arXiv:1505.01942.

B-4

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).

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)

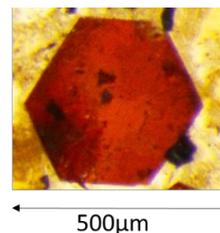


Fig.2: Single crystal of h-LSFO

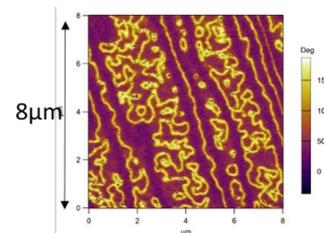


Fig.3: FE domain distribution of h-LSFO in the (001) surface. The color contrast means the direction of polarization along [001].

CeNi₂Ge₂ と LaNi₂Ge₂ の3次元フェルミ面形状変化

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

The three dimensional Fermi surface change in CeNi₂Ge₂ and LaNi₂Ge₂
*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, 強相関係, 4f 電子, 重い電子, c-f 混成, フェルミ面, 光電子分光

4f 軌道が不完全殻の強相関希土類化合物には重い電子系化合物が含まれ, 重い電子, 超伝導, 磁性転移, 価数揺動などの興味深い物性を示す. 本研究では 4f¹ 配置の重い電子系 Ce 化合物と 4f⁰ 配置の La 化合物のフェルミ面を観測し, 両者を比較することで f 電子が伝導電子構造に与える影響を考察する. 強相関希土類化合物は3次元物質であるものの, バルク敏感な領域で励起エネルギーを連続的に変えて電子構造を3次元に分解する測定 [1] は少ない. そこで我々は, 常圧下で超伝導を示し非フェルミ液体的に振る舞う重い電子系化合物 [2] CeNi₂Ge₂ とその参照物質 LaNi₂Ge₂ に対して, SPring-8 BL23SU において最高分解能 70 meV の3次元軟 X 線角度分解光電子分光を行うことで, 両化合物の3次元フェルミ面を詳細に観測した. 図1に, 励起光エネルギーを $h\nu = 600 \text{ eV} - 750 \text{ eV}$ の範囲で変化させることで測定した光電子強度の運動量分布を示す. LaNi₂Ge₂ のフェルミ面は X 点を中心として2次元的な形状をしているのに対し, CeNi₂Ge₂ のフェルミ面は Γ 点方向にのみ突き出すという特徴を持つ. これは, 伝導電子が f 電子と混成することにより Γ 点方向の運動量に変化が生じることを意味する. 一方で, Z 点方向をはじめとする他の運動量空間では両化合物のフェルミ面に大きな変化は観測されていない. このフェルミ面により, c-f 混成効果の明確な運動量依存性を確認した.

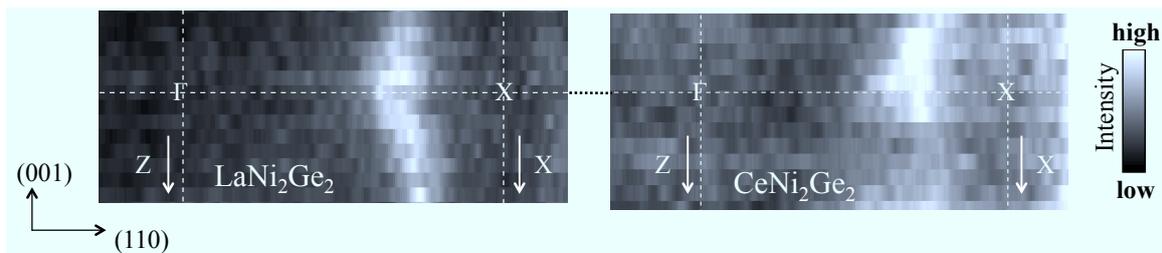


図1: LaNi₂Ge₂ (左), CeNi₂Ge₂ (右) のフェルミ準位上の光電子強度の運動量分布

[1] M. Yano *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 036405 (2007).

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

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。

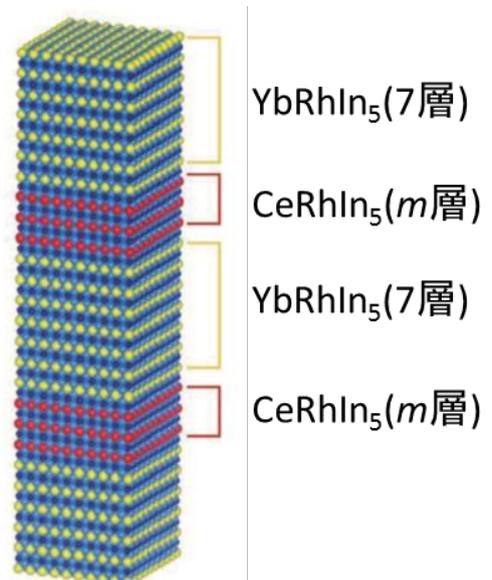


Fig.1 CeRhIn₅(*m*)/YbRhIn₅(7)人工超格子

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

鉄系超伝導体 FeSe における圧力下電子相図

東大新領域 東大物性研 ^AKarlsruhe Inst. for Tech.^B 京大院理 ^C

松浦康平, 水上雄太, 下澤雅明 ^A, 松林和幸 ^A, 山下穰 ^A, 上床美也 ^A,
T. Wolf^B, H. v. Lohneysen^B, 綿重達哉 ^C, 笠原成 ^C, 松田祐司 ^C, 芝内孝禎

The electronic phase diagram in FeSe under high pressure

Dept. of Adv. Mat. Sci., Univ. of Tokyo ^AISSP, Univ. of Tokyo ^BKarlsruhe Inst. for Tech.

^CDept. of Phys., Kyoto Univ.

K. Matsuura, Y. Mizukami, M. Shimozawa^A, K. Matsubayashi^A, M. Yamashita^A,
Y. Uwatoko^A, T. Wolf ^B, H. v. Lohneysen^B, T. Watashige^C, S. Kasahara^C, Y. Matsuda^C,
T. Shibauchi

Keywords: 鉄系超伝導体, 量子臨界点, 圧力下物性測定

鉄系超伝導体FeSeは90Kで正方晶から直方晶へ相転移し[1]、10K程度で超伝導状態へ転移する。そして、圧力下条件で磁気ゆらぎの増大が観測されているが[2]、他の鉄系超伝導体と異なり構造相転移に伴う反強磁性が存在しないという特異性がある。この超伝導発現機構を解明するため、電子状態相図の確立が重要となる。

一方でFeSeは余剰鉄の混入などにより純良単結晶の作製が難しいことが知られており[3]、本質的な物性はあまり解明されていない。しかし近年異なる手法により高純度の単結晶が得られ、これまでとは異なる物性が報告されている。特に圧力下電気抵抗測定から、0.2GPaの圧力領域で未知の起源による跳びが観測され[4]、その現象解明が待たれている。このような背景のもと、より高圧下でのこの異常の振る舞いを明らかにすることはFeSeの本質的電子状態相図を確立する上で重要である。

そこで、本研究では、FeSeの純良単結晶において静水圧性の高い高圧条件下で電気抵抗測定を行い、先行研究による起源不明の電気抵抗率の異常がより高圧下でどのように変化するかを観測し、さらにFeSeの電子状態図の確立を試みた。その結果、起源不明の跳び、超伝導転移温度と電気抵抗率の温度依存性が興味深い圧力依存性を示したので、その起源について議論する。

[1]S. Margadonna *et al.*, Phys. Rev. B **80**, 064506 (2009).

[2]T. Imai *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 177005 (2009).

[3]T. M. McQueen *et al.*, Phys. Rev. B **79**, 014522 (2009).

[4]T. Terashima *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 063701 (2015).

鉄系超伝導体 Fe(Se, S)における電子ネマティック相の研究

東大新領域, 京大院理^A, 東大物性研^B

細井 優, 藏田 聡信^A, 河智 史朗^B, 水上 雄太,
綿重 達哉^A, 笠原 成^A, 徳永 将史^B, 松田 祐司^A, 芝内 孝禎

Measurements of the nematic susceptibility in an iron-based superconductor FeSe
*Dept. of Adv. Mat. Sci., Univ. of Tokyo, ^ADept. of Phys. Kyoto Univ., ^BISSP, Univ. of Tokyo,
^CRCLTMS, Kyoto Univ.*

S. Hosoi, S. Kurata^A, S. Kawachi^B, Y. Mizukami, T. Watashige^A, S. Kasahara^A, M.
Tokunaga^B, Y. Matsuda^A and T. Shibauchi

Keywords: 鉄系超伝導体、電子ネマティック相

鉄系超伝導体において、その多くは低温で正方晶から直方晶への構造相転移を示すが、この相転移に関連して、電気抵抗率等に大きな面内異方性が現れることが知られている[1]。この面内異方性の原因として、電子系が何らかの理由で面内異方性を生じ、それと結合する格子系が電子系に引きずられた結果によるものである可能性が考えられている。この場合、格子系の持つ回転対称性を電子系が自発的に破る広い意味での電子ネマティック相が存在すると考えられる。鉄系超伝導体における面内異方性の研究はこれまでは主に純良な単結晶が得られる BaFe₂As₂ 系において盛んになされており、電気抵抗率や磁気トルクの異方性の測定などから電子系の異方性と超伝導の密接な関連性が指摘されているため[1,2]、この電子ネマティック相の起源を明らかにすることは重要である。これらの系では構造相転移に伴い反強磁性転移が生じるため、その面内異方性の起源として電子の軌道あるいは、スピンの異方性の両面から議論が盛んになされている[3,4]。一方、FeSe は鉄系超伝導体の中でも最も単純な結晶構造を持ち、90 K 付近で正方晶から直方晶への構造相転移を起こすが、構造相転移点以下の低温領域において磁気転移を持たない。従って、鉄系超伝導体の面内異方性の起源を研究する上で重要な系であると考えられる。

我々は、FeSe および Se の等価数元素 S によって置換した Fe(Se, S)において一軸応力に対する電気抵抗率異方性を測定した。この弾性抵抗応答はネマティック感受率と呼ばれており[5]、ネマティック相に関わる重要な物理量である。講演では、観測されたネマティック感受率測定の結果について詳細な議論を行う。

[1] J. H. Chu *et al.*, *Science* **329**, 824 (2010).

[2] S. Kasahara *et al.*, *Nature* **486**, 382 (2012).

[3] W. Lv *et al.*, *Phys. Rev. B* **80**, 224506 (2011).

[4] R. M. Fernandes *et al.*, *Nature Physics* **10**, 97 (2014).

[5] J. H. Chu *et al.*, *Science* **337**, 710 (2012).

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。

層状物質におけるイオンゲート法による超伝導

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}

Superconductivity in layered materials 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, 電気二重層, インターカレーション

層状物質へのキャリアドーピングは、価数の違う原子による置換だけでなく、電界効果ドーピング、インターカレーションによっても行われる。

前者はトランジスタにも用いられているような、ゲート電圧によって物質界面にキャリアをためる手法である。しかし MOSFET のような絶縁膜を挟んで電圧を印加する構造では、その絶縁破壊を防ぐために、大きな電圧は印加できなかった。そこで考案されたのが電気二重層トランジスタ (Electric Double Layer Transistor, EDLT) である。これは電解質あるいはイオン液体のような、正イオンと負イオンが電離している液体で FET の絶縁膜を置き換えた構造をしている。ゲート電圧を印加してチャンネル界面に電気二重層を作ること、強力なキャリアドーピングとなり、絶縁体を金属へ変え、さらには超伝導を誘起する [1, 2]。この超伝導は界面という二次元性、強力な面直電場などによって、特異な超伝導であると考えられるが、その性質の測定は液体の必要性によって妨げられている。その状況を打開することが本研究の主旨の 1 つである。

後者のインターカレーションとは、層と層の間にアルカリ金属などを入り込ませることである。イオンとしての性質を強く残した金属は、母物質の層にキャリアを供給する。これによっても物質は絶縁体から金属、超伝導体へと変化する。しかしインターカレーションされた単結晶を得ることは難しく、多結晶での実験が中心となる。近年発案された iFET (ionic-gated Field Effect Transistor) はゲート電圧によって単結晶にインターカレーションを行う手法で、EDLT と同じく電解質を用いる [3]。これを用いて、これまで多結晶で研究されてきた物質の精確な測定や、存在が予言されているトリプレット超伝導体の探索がもう 1 つの主旨である。

講演では、上記の実験の現状について報告する。[4]

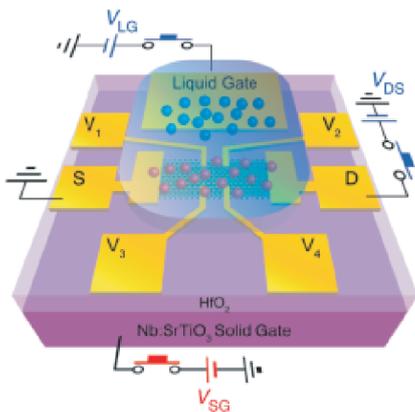


図 : EDLT の模式図。Ref. 2 より引用。

- [1] J. T. Ye *et al.*, *Nature Mater.* **9**, 125 (2010)
- [2] J. T. Ye *et al.*, *Science* **338**, 1193 (2012)
- [3] Y. Yu *et al.*, *Nature Nanotech.* **10**, 270 (2015)
- [4] Y. Nakagawa *et al.*, in preparation

軌道秩序を有する遷移金属ダイカルコゲナイド
CrSe₂の走査トンネル分光

東理大理, 京大院理^A

藤澤唯太, 島袋竜成, 出村郷志, 小林慎太郎^A,
植田浩明^A, 道岡千城^A, 吉村一良^A, 坂田英明

Scanning tunneling spectroscopy on the orbital ordered transition metal
dichalcogenide; CrSe₂

Tokyo Univ. of Science, ^AKyoto Univ.

Y. Fujisawa, T. Shimabukuro, S. Demura, S. Kobayashi^A,
H. Ueda^A, C. Michioka^A, K. Yoshimura^A, H. Sakata

Keywords: 走査トンネル分光, 軌道秩序, 遷移金属ダイカルコゲナイド

遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)の一種である 1T-CrSe₂ は 190 K と 170 K で電気抵抗と磁化率の変化を伴った構造相転移を示し, 低温(LT)相では超格子構造を有する. 結晶構造に強い二次元性を持つ TMDC と言えば, パイエルス不安定性による CDW 転移が有名であるが, この物質の場合は, 磁化率の振る舞いが従来の CDW 物質とは異なるため別の解釈が必要である. 小林らは単結晶試料を合成することに成功し, 輸送測定や詳細な構造解析からこれらの転移は Cr の価数不安定性と軌道自由度が引き起こす逐次転移であり, LT 相では, Cr³⁺ と Cr⁴⁺ が Fig. 1 に示すような空間パターンを形成すると結論付けた (Ref. 1). 今回我々はこの LT 相のモデルを検証するため, 走査型トンネル顕微鏡 (STM) を用いて (001) 面の実空間観察を試みた. 結果, 先行研究と矛盾しない超格子構造を観察することに成功した [Fig. 2]. 発表当日は, この STM 像と走査トンネル分光測定の結果から LT 相のモデルを検証する予定である.

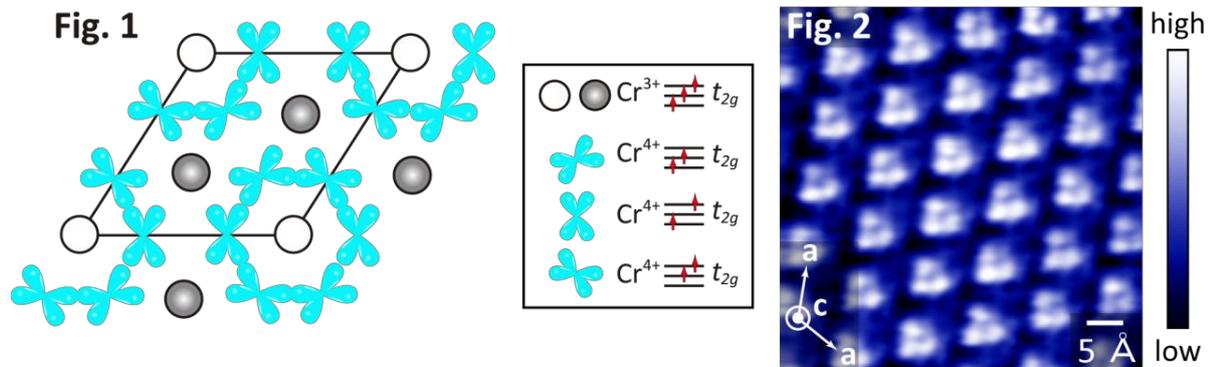


Fig. 1; LT 相で予測されている Cr の電子状態モデル.

Fig. 2; 4.2 K で得られた CrSe₂ 劈開表面の STM 像. $V_{\text{set}} = 400\text{mV}$, $I_{\text{set}} = 200\text{ pA}$

(Ref. 1) S. Kobayashi *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 054413 (2014).

トンネルダイオード発振器を用いた精密磁場侵入長測定と超伝導ギャップ構造の決定

東大新領域^A, Max-Planck-Inst for Chemical Physics of Solids^B

竹中崇了^A, 水上雄太^A, H. S. Jeevan^B, C. Geibel^B, 芝内孝禎^A

Precise penetration depth measurements by using tunnel diode oscillator
and determination of the superconducting gap structure

*Dept. of Adv. Mat. Sci., Univ. of Tokyo^A,
Max-Planck-Inst for Chemical Physics of Solids^B*

Takaaki Takenaka^A, Yuta Mizukami^A, H. S. Jeevan^B, C. Geibel^B, Takasada Shibauchi^A

Keywords : 非従来型超伝導体, 磁場侵入長, Unconventional Superconductor,
Penetration Depth

超伝導体に特徴的な物理量として、磁場侵入長が挙げられる。磁場侵入長は、マクロな視点では文字通り超伝導体の表面からどの程度磁場が入り込むかということを表す量だが、ミクロな視点から見れば、磁場侵入長 λ は超流動電子密度 n_s に関係していることから、低温での準粒子励起の様子を直接反映する量となる。従来型超伝導体では、超伝導ギャップ関数に波数依存性がなく、磁場侵入長の温度依存性は $\lambda \propto \exp(-\Delta_0/k_B T)$ という指数関数的な振る舞いを見せるが、フェルミ面上に超伝導ギャップ関数が0となる箇所(ノード)を有する非従来型超伝導体では、ノードがフェルミ面上で取る構造によっては、指数関数的ではなく T のべき乗に従うような温度依存性を見せる。そのため、低温での磁場侵入長を精密に測定を行うと、その結果から超伝導ギャップ構造を、さらには超伝導発現機構について議論することが可能となる。

本講演では、我々が現在主に用いているトンネルダイオード発振器 (Tunnel Diode Oscillator: TDO) による磁場侵入長の測定 [1] について紹介する。磁場侵入長を測定する他の実験手法として、マイクロ波空洞共振器摂動法、ミュオンスピン回転緩和法 (μ SR) 等があるが、これらの手法との比べ、TDO による測定にはどのようなメリットがあるのかを説明する。また、我々が実際に TDO を用いて非従来型超伝導体に対して磁場侵入長測定を行った結果についても紹介する。

[1] E. M. E. Chia, PhD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign (2004).

超伝導体の渦糸格子状態における量子渦にかかる力の解析

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

須貝駿貴, 加藤雄介

**Analysis of driving forces applied to a vortex lattice in a type-II
superconductor**

Department of Basic Science, The University of Tokyo

Shunki Sugai and Yusuke Kato

Keywords: 超伝導, 渦糸格子, Superconductivity, vortex lattice

第二種超伝導体の混合状態における超伝導量子渦にかかる力については Bardeen-Stephen, Nozieres-Vinen 以来の論争がある。20 年前には Ao-Thouless の用いた解釈に Sonin が反例を挙げている。この中で、量子渦を駆動する力に関する論点；それがローレンツ力かマグナス力か、について取り上げる。量子渦の時間発展を記述する方程式は時間に依存する Ginzburg-Landau 方程式や Keldysh グリーン関数の運動方程式などがある。散逸の効果を取り入れたこの方程式で、渦糸状態におけるフラックフロー抵抗、ホール抵抗などの輸送係数が計算されている(Larkin-Ovchinnikov, Kopnin など)。同じ枠組みで渦にかかる力を正しく定式化できれば、これまでの論争に説得的な解決を与えることができる。ここでは、時間に依存する Ginzburg-Landau 方程式を採用することにし、種々の力を計算することを目指す。

本講演ではまず, Abrikosov による渦糸格子の平衡状態の解について触れる。次に時間依存する Ginzburg-Landau 方程式でのアプローチとして Schmid による渦糸格子のフロー状態の解(非平衡状態)について触れた後, 渦糸格子のフロー状態においてかかる力の定式化について紹介する。今回は特にローレンツ力の計算について紹介する予定である。

[1] A. A. Abrikosov, J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) **32**, 1442 (1957)

[2] A. Schmid, Phys. kondens. Materie **5**, 302 (1966)

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 Fridel 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。

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

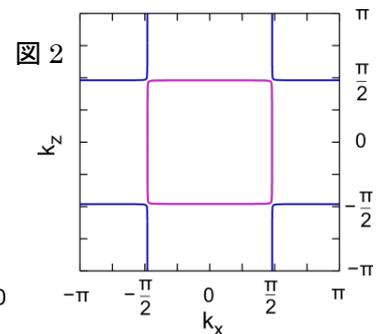
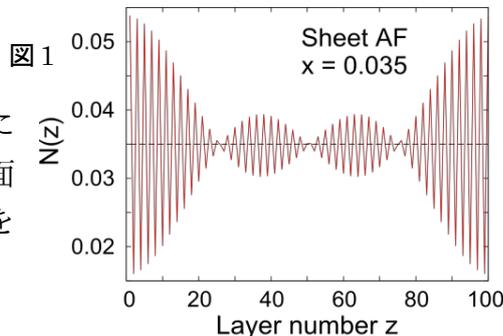
(i,j: サイト γ, γ' : e_g 電子の軌道 $t_{\gamma\gamma'}^a$: ホッピング S_{iz} : t_{2g} イジングスピン ± 1)

$D_{i,i+a} = (1 + S_{zi} S_{zi+a})/2$ 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。



Hofstadter's butterfly とその性質

東大理^A吉岡信行^A

The nature of Hofstadter's butterfly

Dept. of Phys., Univ. of Tokyo^ANobuyuki Yoshioka^A

Keywords : フラクタル、連分数展開、磁気並進対称性、量子 Hall 効果、Dirac fermion、異常量子 Hall 効果

垂直磁場下に置かれた2次元正方格子上的 non-interactive な電子を tight-binding model で扱ると、フラクタルな量子相図が現れる [1]。このグラフは、その蝶のような形から Hofstadter's butterfly と呼ばれており、知る人ぞ知る奥深い性質を持つ。その最たる例が量子 Hall 効果であり、任意の磁場、エネルギーギャップ中において Hall 係数 σ_{xy} が量子化されることが知られている。Thouless *et al.* はこの証明を与えると共に、ギャップのラベル (エネルギーの高い側から数えたときの番号) と σ_{xy} を 1 対 1 に対応づける diophantic equation が存在すると主張した [2]。

本講演ではモデルの導入から始め、具体例を交えながら詳細な説明を行う。さらに、我々の得た研究成果として、massless Dirac fermion による異常量子 Hall 効果が diophantic equation の物理的な正当化を与えることを示す。

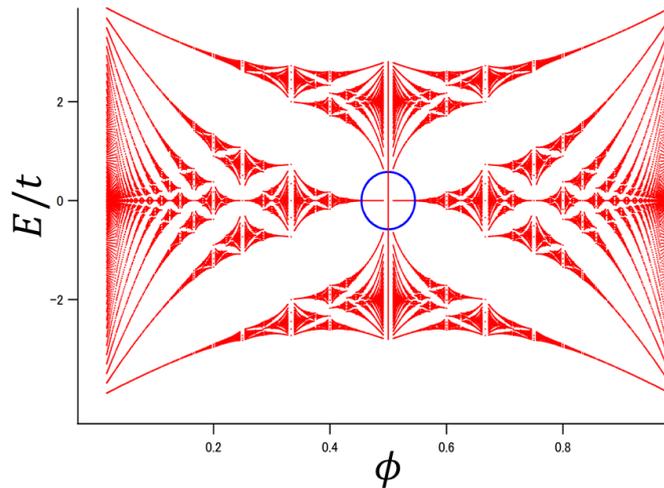


図 1: Hofstadter's butterfly と呼ばれる量子相図。青い円の中心は Dirac point と呼ばれ、Dirac fermion 特有の Landau 準位を持つ。

References

[1] D. R. Hofstadter, Phys. Rev. B **14**, 2239 (1976).

[2] D. J. Thouless, M. Kohmoto, M. P. Nightingale, and M. den Nijs, Phys. Rev. Lett. **49**, 405 (1982).

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 次元の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)

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。

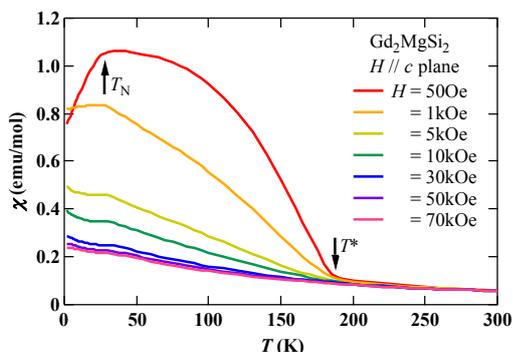


図 1: Gd_2MgSi_2 帯磁率の磁場依存性

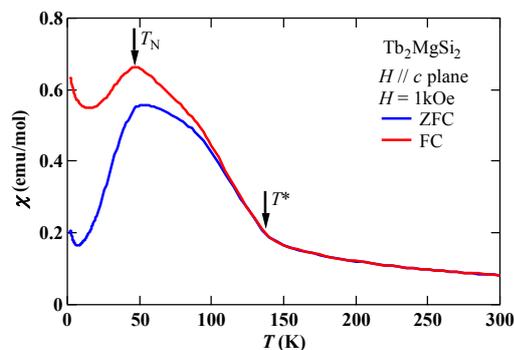


図 2: Tb_2MgSi_2 帯磁率の温度ヒステリシス

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

レーザー照射下の強相関トポロジカル絶縁体

京大理
高三 和晃

Photo-induced phase transition of topological Kondo insulators

Dept. of Phys. Kyoto Univ.

Kazuaki Takasan

Keywords : Floquet 理論・量子 Hall 効果・Weyl 半金属

物質に強いレーザー光を当てると電子はレーザー光によって駆動される。電子たちが集団的に応答することで多様な量子現象を引き起こす。そうした光誘起量子現象は、レーザー技術の発達に伴って、近年特に精力的に研究されている。例えばレーザー光を照射したグラフェンにおいて量子 Hall 相が実現されること[1]やレーザーパルスを Mott 絶縁体に当てると光によってキャリアが励起して金属状態になること[2]が明らかにされてきた。

我々は、強相関トポロジカル絶縁体にレーザー光を照射した際にどのような変化が起こるかを理論的に調べた。レーザー光によって電子状態のトポロジーや電子相関効果がいかに変調され、物質のマクロな性質を変えるかというのは興味深い問題である。本発表では特にトポロジカルな性質に対する効果に焦点を当てて報告する。

本研究では、周期外場下の系を記述できる Floquet 理論を用いて、高周波レーザー下での有効モデルを導出して解析を行った。2次元のトポロジカル絶縁体に円偏光レーザーを照射した場合には、複数のカイラルエッジモードを持った量子 Hall 相が実現されることが分かった(図1)。レーザー強度によるエッジモードの本数の変化を調べ、トポロジカル相転移の様子を明らかにした(図2)。3次元の場合については、特異な表面状態や電磁応答で知られる Weyl 半金属相が実現されることを示した。これらの現象は、円偏光レーザーによって系の持っていた対称性が変化し、有効的な“磁場”が誘起されたという描像で理解出来ることを議論する。

なお、本発表は川上則雄・中川大也(いずれも京大理)との共同研究による。

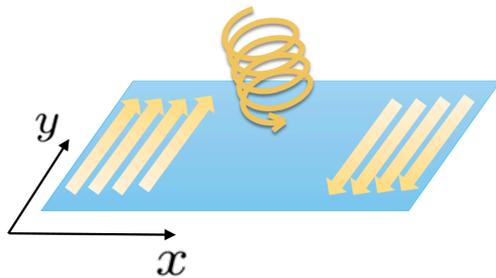


図1 : 円偏光レーザー照射下の
カイラルエッジモードの模式図

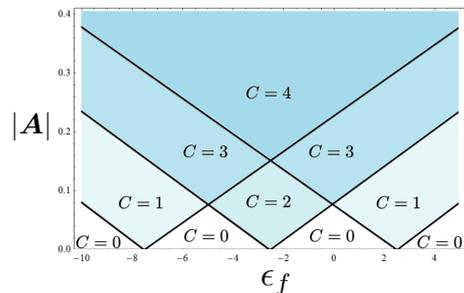


図2 : トポロジカル相図
(縦軸はレーザー強度、横軸は f 電子準位、
 C はトポロジカル数)

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

[2] S. Iwai *et al.* Phys. Rev. Lett. **91**, 057401 (2003).

グラフェン水素化原子欠損における近藤効果

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

The Kondo effect at a hydrogenated graphene vacancy

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

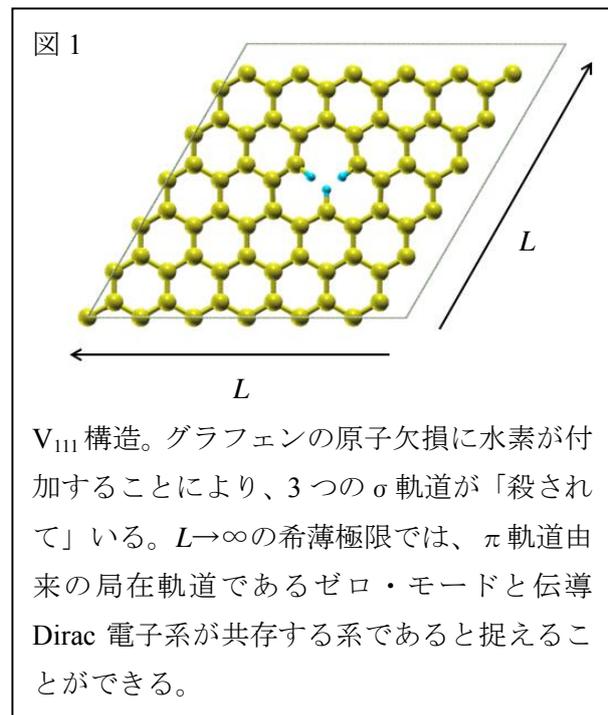
MORISHITA Naoki^A, Gagus Ketut Sunnardianto^A, MARUYAMA Isao^B, and KUSAKABE Koichi^A

Keywords: グラフェン, ゼロ・モード, 近藤効果, スピン量子デバイス

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

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)[3]に着目し、電子同士の多体相互作用によって引き起こされる効果から発生する「近藤効果」についての理論的・数値的解析を行った[4]。

今回の発表では、この研究について、DFT 計算に基づく有効多体電子モデル形成から、モデルに対する連続虚時間モンテカルロ法[5]を用いた数値計算の手法、そして近藤効果発現・近藤温度の評価までの一連の流れを簡単に紹介する。また、将来の研究の展望として、いわゆる擬ギャップ近藤問題やスピン量子デバイスへの応用の可能性についても触れる予定である。



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

[4] A Toolbox for Research on Interacting Quantum Systems (TRIQS), <http://ipht.cea.fr/triqs/>

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

E- 2

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)

E-3

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)

表面弾性波による量子状態の制御への試み

大阪大学大学院理学研究科物理学専攻

横井雅彦, 則元将太, 荒川智紀, 新見康洋, 小林研介

Control of quantum electronic state by using surface acoustic wave

Department of Physics, Graduate School of Science, Osaka University

Masahiko Yokoi, Shota Norimoto, Tomonori Arakawa, Yasuhiro Niimi, Kensuke Kobayashi

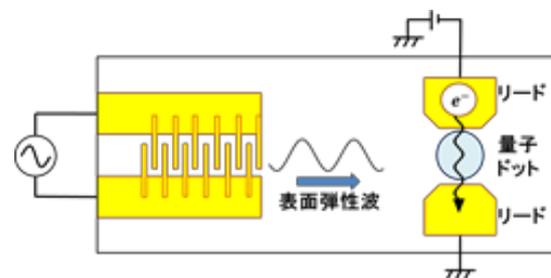
Keywords: 量子ドット, 表面弾性波, quantum dot, surface acoustic wave

GaAs/AlGaAs のヘテロ接合中の 2 次元電子系(2DEG)は、量子的な現象を制御・観測するのに理想的な系である。この系では電子の干渉や閉じ込め効果を実現することができ、これを用いた様々な研究が報告されている。

閉じ込め効果を実現した典型的な系が量子ドットである。量子ドットとは電子をゼロ次元的に閉じ込めた系である。この系では、電子のエネルギー準位は離散化する。ゲート電圧を制御することによって電子一個の出し入れを行うことができる。このように、量子ドットにおいては、一定のゲート電圧やバイアス電圧の下での伝導特性が研究されてきた。しかし現在、時間に対して変動する、動的な系の制御が一つのテーマとなっている。

動的な系の制御の手段として注目されているのが表面弾性波である[1 - 4]。表面弾性波とは物体の表面に局在した弾性波であり、圧電素子に電場を印加し、結晶を歪ませることで誘起される。表面弾性波は GaAs/AlGaAs の 2DEG 中に静電ポテンシャルの波を生成し、このポテンシャルの波に乗せて電子を輸送するといった動的な電子の制御が可能となる。

本研究は、表面弾性波による電子の量子状態の制御を目指したものである。2DEG 中に形成した量子ドットに表面弾性波を印加し、その伝導特性を測定した。その結果について報告する。



[1] W. J. M. Naber *et al*, Phys. Rev. Lett. **96**, 136807 (2006).

[2] R. P. G. McNeil *et al*, Nature **477**, 439 (2011).

[3] H. Sanada *et al*, Nature Phys. **9**, (2013)

[4] 山本倫久 *et al*, 日本物理学会誌 **68**, 5 (2013)

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。

従来の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)

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)

遷移金属カルコゲナイドを用いた円偏光発光トランジスタ

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}

Circular-polarized electroluminescence in transition metal dichalcogenides

^AUniv. of Tokyo, ^BCEMS RIKEN

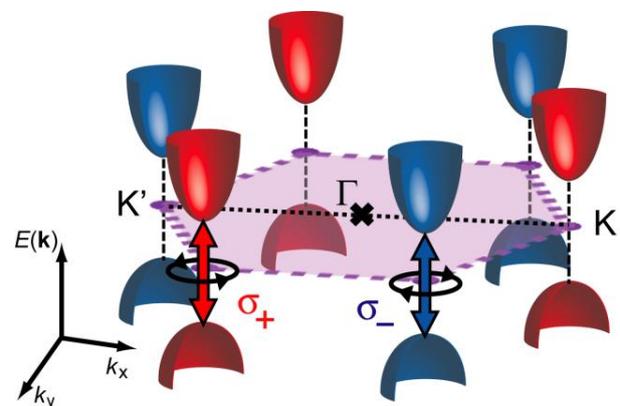
Masaru Onga^A, Yijin Zhang^A, Ryuji Suzuki^A, Yoshihiro Iwasa^{A,B}

Keywords: 遷移金属カルコゲナイド、バレートロニクス、円偏光発光

単層グラファイト“グラフェン”の勃興以来、二次元結晶の研究は物性物理学における大きな潮流となってきた。その中で遷移金属カルコゲナイド（Transition Metal Dichalcogenides, TMDs）は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）をスピンのような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 TMDs のバレー自由度は円偏光により選択的なアクセスが可能であるため、その光学的側面の研究が物理的に興味深い。

本研究では遷移金属カルコゲナイドの一種である MoSe₂ を用いて両極性トランジスタを作製し、電流注入による円偏光発光を実現した。これは先に WSe₂ で報告された円偏光発光トランジスタの特性を MoSe₂ でも達成したものである[1]。この光源は磁気的な注入なしに円偏光発光を実現するもので、更にその偏光発光を電氣的に反転させることができる点が画期的であると言える。その基礎特性に加え分極率の温度依存性を測定し、分極率は 6 K で 66 % に達した [2]。

本発表では、遷移金属カルコゲナイドのバンド構造やその“バレー”の特徴を概説した後、デバイス構造である電気二重層トランジスタ（EDLT）、電氣的に形成された p-i-n 接合を紹介する。その上で本研究における電流注入発光における円偏光分極機構を説明し、その MoSe₂ における実験結果を提示する[2]。近年話題となっている TMDs におけるバレー物理を概観しつつ、我々の作製した発光素子の原理・特徴を説明したい。



図：TMDs におけるバレーと光学選択則。

K(K') 点のバレーと σ_+ (σ_-) がカップリングする。

[1] Y. J. Zhang, *et al.*, Science **344**, 725-728 (2014).

[2] M. Onga, *et al.*, in preparation.

Ferroelectricity in Atomically Thin MoS₂ Studied From First Principles

ISSP, The Univ. of Tokyo^A, *ADSM, Hiroshima Univ.*^B
Jiyeon LEE^A and Tatsuya SHISHIDOU^B

Keywords : MoS₂, transition metal dichalcogenide, 2-dimensional material, first principles calculation, ferroelectricity

MoS₂ has been attracting extensive interests as a promising candidate for next-generation nanoscale electronic devices[1]. Its common 2-dimensional form is known as 2*H* structure of triangular prism building block. With Li intercalation[2], however, MoS₂ can also be synthesized in the 1*T* structure of the two staggered S lattice planes[Fig. 1] with edge-shared octahedral structure.

Very recently, Shirodkar and Waghmare have theoretically shown that a 1*T* monolayer MoS₂ can be an atomically thin ferroelectric material[3]. The ferroelectric instability, caused by Mo trimerization[Fig. 2], is strongly coupled to the Mo d states, opening an insulating band gap, further pulling up some of the S atoms along a plane normal. In this work, we reexamined their proposal first. By adopting highly precise all-electron full-potential linearized augmented-plane-wave method, we performed systematic study on the 1*T* monolayer MX₂ (*M*=Mo, W; *X*=S, Se, Te) and clarified all examined materials show ferroelectricity. A comparison between the 2*H* and 1*T* structures was also made.

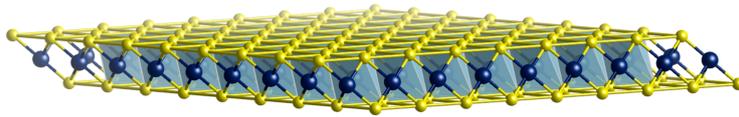


Figure 1: 1*T* monolayer MoS₂ with octahedral structure.

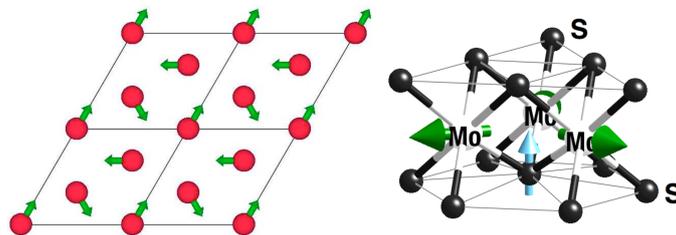


Figure 2: Atomic displacement from Mo trimerization.

- [1] Q. H. Wang, K. Kalantar-Zadeh, A. Kis, J. N. Coleman, and M. S. Strano, *Nature Nanotechnology* **7**, 699 (2012).
- [2] D. Yang, S. J. Sandoval, W. M. R. Divigalpitiya, J. C. Irwin, and R. F. Frindt, *Phys. Rev. B* **43**, 12053 (1991).
- [3] Sharmila N. Shirodkar and Umesh V. Waghmare, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 157601 (2014).

F- 2

一次元スピンレスフェルミオン模型における磁束クエンチ

東京大学物性研究所
中川裕也

Flux quench in interacting spinless fermions in one dimension

Institute for Solid State Physics, the University of Tokyo

Yuya Nakagawa

Keywords : 量子クエンチ, 量子ダイナミクス, 一次元系, iTEBD 法

近年、冷却原子系や半導体メゾスコピック系において非平衡量子状態を直接制御・観測する実験が可能になり、非平衡下での量子多体系の振る舞いが盛んに研究されている [1]。特に、系のパラメータを断熱定理が使えない程度に速く変化させ、その後の時間発展を調べる「量子クエンチ」というセットアップがよく用いられている。

我々は相互作用する一次元スピンレスフェルミオン系において、磁束クエンチという量子クエンチ問題を研究した。磁束クエンチは、一次元系のリングに通した初期磁束 ϕ を突然切る (0 にする) クエンチであり、このクエンチによって系に粒子カレントが誘起される。我々はこの誘起されたカレントの時間発展を iTEBD (inifinite Time-Evolving Block Decimation) 法で数値計算した。その結果、カレントは減衰振動して定常値に緩和していくが、そのダイナミクスは系の相互作用パラメータ Δ と初期磁束の大きさ ϕ に強く依存していることが分かった (図 1 左)。我々が注目したのは主に以下の二点である。

(1) カレントの振動: 粒子の運動量分布の時間発展 (図 1 右) から、カレントの振動は (磁束によってシフトされた) フェルミ面から遠く離れた粒子のウムクラップ散乱によって引き起こされていることが分かった。

(2) カレントの長時間極限 (定常値 $J(t = \infty)$): 初期磁束の大きさ ϕ についての線形応答理論との比較により、磁束クエンチ後のカレントの長時間極限は相互作用パラメータ Δ の符号 (引力・斥力) に大きく依存した非自明な非線形性を持つことが明らかになった。

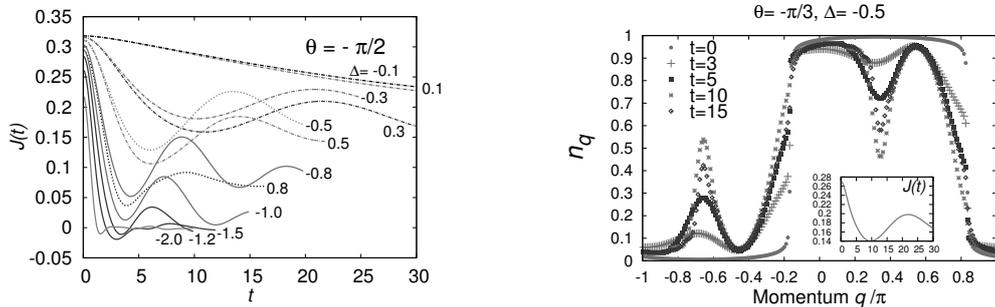


図 1: 左: 磁束クエンチ後のカレントの時間発展。 θ は初期磁束。相互作用パラメータ Δ は $H = -1/2 \sum_i (c_i^\dagger c_{i+1} + c_{i+1}^\dagger c_i + 2\Delta c_i^\dagger c_i c_{i+1}^\dagger c_{i+1})$ で定義される。右: 粒子の運動量分布の時間発展。シフトされたフェルミ面から離れた箇所 dip/peak 構造がみられる。Inset は対応するカレントの時間発展。

[1] A. Polkovnikov *et al.*: Rev. Mod. Phys. **83**, 863 (2011).

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).

U(N)対称なフェルミオン系の超流動状態の N の偶奇性の違い

東大理物理^A, 理研^B

東川 翔^A, 上田 正仁^{A,B}

N-Parity difference in superfluid state in U(N)-symmetric fermion

^AUniversity of Tokyo, ^BRIKEN

Sho Higashikawa^A and Masahito Ueda^B

Keywords: 冷却原子系, SU(N)系, フェルミオン超流動

近年、冷却 Yb 原子により U(N)(N≤6)対称性を持つフェルミオン系が実現された [1]。これにより、従来理論上の産物と考えられてきた SU(N)ハバード模型や SU(N)ハイゼンベルグ模型の量子シュミレーションが可能になると期待されている。また、これらの系は光格子や人工ゲージ場などの冷却原子系の高い操作性と組み合わせることで多彩な超流動と磁性を示すと考えられ、大きな注目を集めている。

N 成分フェルミオン超流動の特徴は、ペアリングの仕方(ペアリングの平均場 $\langle\psi_i\psi_j\rangle(i,j=1,2\cdots N)$) が多種多様な点である。このため平均場の解析でさえ難しく、理論的には N=3,4 しか解析されておらず[2,3]、実験で実現された N=6 [1]とは隔たりがある。

我々は、引力相互作用する U(N)対称な N 成分フェルミオン系で現れる超流動状態を平均場+RPA で解析し、上記のペアリング問題の一般解を発見した。これから、次の 2 点を明らかにした。

1. N の偶奇で超流動状態の定性的性質が異なる(下表)。N が偶数の場合、基底状態は N/2 種類のクーパーペアが凝縮した状態であり、超流動量子渦(波動関数の位相欠陥)が安定に存在するが放物型($\omega\propto k^2$)分散の南部ゴールドストーンモード(NG モード)は存在しない。N が奇数の場合、基底状態は(N-1)/2 種類のクーパーペアの凝縮とフェルミ面が共存した状態であり、量子渦は安定に存在しないが放物型分散の NG モードが存在する。特に N が奇数の場合の結果は従来良く研究がされてきた N=2(2 成分超流動)とは著しい対照を成す。

2. N 成分の任意温度・任意粒子数での熱力学関数 $f[N]$ は N=1(フェルミ縮退),N=2(2 成分超流動)の熱力学関数 $f[N=1]$ と $f[N=2]$ の一次関数で表される(下表右)。また、任意の N に対し、集団モードのスペクトルは N に依らない 3 種類の関数で表される。SU(N)系は従来 largeN 近似で解析されてきたが、本結果はその近似の妥当性を検証する上で有効である。

	基底状態	量子渦	放物型分散 NG モード	熱力学関数 $F[N]$
N:偶数	N/2 種類のペアの凝縮状態	あり	なし	$F[N]/N = F[2]/2$
N:奇数	(N-1)/2 種のペアの凝縮状態と 1 種類のフェルミ縮退の共存	なし	あり	$(F[N] - F[1]) / (N-1) = F[2]/2$

[1] S. Taie *et al.*, Nat. Phys. **8**, 835 (2012)

[2] R. W. Cheng *et al.*, Phys. Rev. Lett **99**, 130406 (2007)

[3] A. Rapp *et al.*, Phys. Rev. Lett **98**, 160405 (2007)

孤立量子系の「平衡」への緩和とは？

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

Equilibration in Isolated Quantum Systems
The University of Tokyo, Department of Basic Science
Kazuya Kaneko

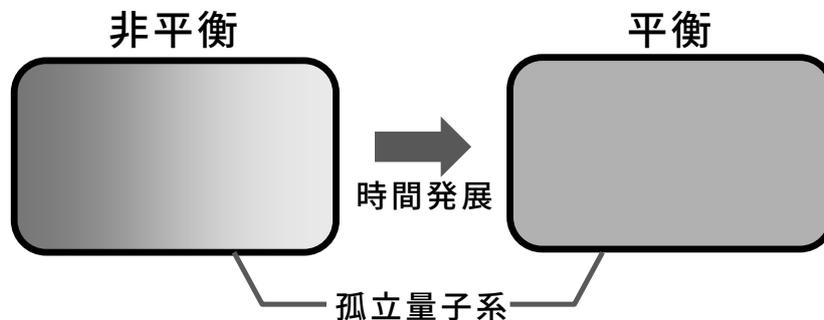
Keywords : Statistical Mechanics

「系を孤立させて十分長い時間放置すれば、どんなマクロ変数も時間変化しない特別な状態へと移行する。このときの系の状態を平衡状態 (equilibrium state) と呼ぶ。」

上の文は清水さんの熱力学の教科書 [1] の要請 I-(i) です。この緩和の要請は熱力学の問題を解くときにはほとんど使いませんが、熱力学では重要な要請です。熱平衡状態への緩和が起こることは経験的には明らかですが、物理的にはどうして平衡化が起こるのでしょうか？マクロな熱力学系も突き詰めていけば、すべて原子や電子などのミクロなものから構成されているのですから、量子力学から導けるのではないかと誰もが考えると思います。ところが、この試みは未だに成功はしていません。量子力学から熱力学を導くのは困難な問題なのです。

近年、この長年の未解決問題に再び注目が集まり研究がなされています。それは、(i) 冷却原子を使って孤立量子系に近い状態を作って実験ができるようになった、(ii) 量子情報の分野のエンタングルメントといった量を量子多体系に応用するような新しいアプローチの研究が行われるようになったためです。

本講演では量子系の平衡化に関する理論的な研究について（勉強したことを）発表します。



[1] 清水 明, 「熱力学の基礎」 (東京大学出版, 2007).

[2] C. Gogolin and J. Eisert, *Equilibration, thermalisation, and the emergence of statistical mechanics in closed quantum systems* (2015), arXiv:1503.07538.

F-6

どのくらい待てば あなたが 本当に判る

慶應義塾大学大学院 理論研究室 齊藤圭司グループ
花里太郎

Introduction to "Waiting for rare entropic fluctuations
Department of Physics, Keio university
Taro Hanazato

Keywords : 統計物理, 時間方向の統計力学, **First Passage Time Distribution**

First Passage Time とは、時間変動する量が、ある設定された値に初めてたどり着くまでにかかった時間を意味する。この時間を、次々と計測することにより、時間についての分布をとったものが、First Passage Time Distribution(以下、FPTD とする。)である。

FPTD は、いわゆる破産問題などにつながり、確率的なテーマとして興味を持たれてきた。しかし最近、文献 [1] により、非平衡物理系におけるゆらぐ物理量の FPTD について研究がなされた。実は、ゆらぐ物理量の FPTD について、その漸近的な関数形に、物理量のキュムラントの情報が含まれていることがわかった。

本講演では、基本的な FPTD の知識から始まり、文献 [1] をわかりやすく解説することを目標に、「時間方向の統計的な見方」の魅力をお伝えしたいと考えている。

[1] K. Saito and A. Dhar , arXiv:1504.02187. (2015)

[2] S. Redner, *A Guide to First-Passage Processes*, Cambridge University Press (2001)

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。

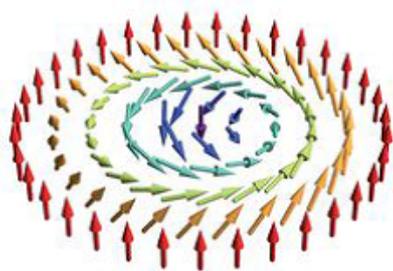


図 1: スキルミオン

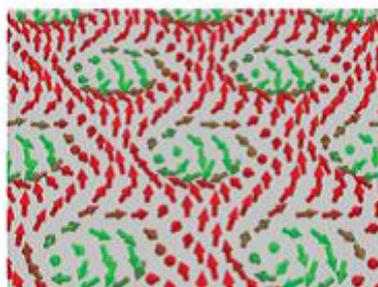


図 2: スキルミオン結晶

[1] N. Nagaosa and Y. Tokura, *Phys. Scr.* T146, 014020 (2012)[2] K. Hamamoto, M. Ezawa and N. Nagaosa *arXiv* :1504.06024

有機ディラック電子系 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ 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) $_2$ I $_3$** ^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) $_2$ I $_3$ 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) $_2$ I $_3$ は、伝導を担う BEDT-TTF 分子の層と絶縁体である I $_3$ 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) $_2$ I $_3$ 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)