

平成 2 7 年 度

京 都 大 学 大 学 院 理 学 研 究 科

修 士 論 文 発 表 会

修 士 論 文 要 旨 集

2 0 1 6 年 2 月 1 日 ( 月 )、 2 月 2 日 ( 火 )

物 理 学 第 一 分 野

# 物理学第一分野修士論文発表会

場所：理学研究科5号館 5階・第四講義室  
発表：15分（別に質問時間5分程度）

---

2016年2月1日（月）9：00～

---

## 目次

1. 磁場下の多バンド超伝導の理論  
足立 景亮（9：00）・・・ 1
2. 赤外分光による多孔性配位高分子における水の吸着状態の研究  
市井 智章（9：20）・・・ 2
3. 光 Lieb 格子を用いた副格子間の空間的断熱移送  
一ノ瀬友宏（9：40）・・・ 3
4. 単一半導体ナノ粒子の発光明滅とスペクトル拡散  
伊吹 博人（10：00）・・・ 4
5. Coupled Wire Construction and Modified Wilson Line  
今村 征央（10：20）・・・ 5

---

10：40～10：50 休憩

---

6. 時間周期的に駆動される量子系の定常状態：量子開放系と近藤模型の解析  
岩堀 功大（10：50）・・・ 6
7. WSe<sub>2</sub> 単層膜結晶の共鳴二次光学過程の研究  
草場 哲（11：10）・・・ 7
8. 光格子中イッテルビウム原子の量子気体顕微鏡の実現  
久野 拓馬（11：30）・・・ 8
9. 流体方程式に対する境界条件の微視的理解  
高木 裕義（11：50）・・・ 9
10. トポロジカル近藤絶縁体における光誘起相転移  
高三 和晃（12：10）・・・ 10

---

12：30～13：30 昼休み

---

11. 重い電子系トリコロール超格子におけるグローバルな空間反転対称性の破れ  
戸田琳太郎（13：30）・・・ 11

1 2. 散逸により誘起される光格子中 Bose 気体の強相関状態	富田 隆文 (13 : 50) . . . . .	12
1 3. 非弾性 X 線散乱実験による低密度液体 Rb のプラズモン測定	萩野 透 (14 : 10) . . . . .	13
1 4. 定常外力下の二次元流れにおける空間局在ダイナミクス	蛭田 佳樹 (14 : 30) . . . . .	14
1 5. 2次元 Ising 系の界面ダイナミクスの研究	増本 雄亮 (14 : 50) . . . . .	15

---

15 : 10 ~ 15 : 20 休憩

---

1 6. 高純度ダイヤモンド結晶における励起子拡散機構の解明と歪みトラップの実現	森本 光 (15 : 20) . . . . .	16
1 7. スピン三重項超伝導体 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ で生じる半整数量子フラクソイド状態	安井 勇気 (15 : 40) . . . . .	17
1 8. 不純物 Disorder 効果による表面局所融解と Slippery 界面	山下 真澄 (16 : 00) . . . . .	18
1 9. ハロゲン化鉛ペロブスカイト半導体 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ ( $\text{X}=\text{I}, \text{Br}$ ) 単結晶の光キャリアダイナミクス	山田 琢允 (16 : 20) . . . . .	19
2 0. リカレントニューラルネットワークの微視的不安定性	山中 讓 (16 : 40) . . . . .	20

---

17 : 00 ~ 17 : 10 休憩

---

2 1. トポロジカル絶縁体における交流スピホール伝導度への電子相関効果の研究	遠藤伸明起 (17 : 10) . . . . .	21
2 2. 後流を介した群れの編隊維持と抵抗軽減	天目 直宏 (17 : 30) . . . . .	22
2 3. 二色型光格子中の Bose 凝縮体における非線形効果について	原 良甫 (17 : 50) . . . . .	23
2 4. Study of superfluid $^3\text{He}$ phases in stretched aerogel	楊 思偉 (18 : 10) . . . . .	24

18 : 30 終了

---

---

2016年2月2日(火) 9:00~

---

---

25. 超低温イッテルビウムーリチウム原子間の衝突特性の測定  
植田 信也 ( 9:00) . . . . . 25
26. 重水素化蛋白質の作成とその評価方法に関する研究  
上村 拓也 ( 9:20) . . . . . 26
27. 境界の幾何形状に誘起されるバクテリアの集団運動  
衛藤 貫太 ( 9:40) . . . . . 27
28. 平行平板中の超流動  $^3\text{He-A}$  相における Surface Chiral Domain Wall により安定化されたテクスチャー  
岡本 耀平 (10:00) . . . . . 28
29. イッテルビウムフェルミ同位体を用いた基底状態と準安定状態のフェッシュバツハ分子の生成  
坂本 迅 (10:20) . . . . . 29

---

10:40~10:50 休憩

---

30. 磁気トルク測定による  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$  の電子ネマティック状態の直接観測  
下山 祐介 (10:50) . . . . . 30
31. 強磁性体  $\text{SrRuO}_3$ /スピン三重項超伝導体  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  ハイブリッド構造の電気伝導および磁気特性  
杉本 雄亮 (11:10) . . . . . 31
32. 量子f-ダイバージェンスの一般化とその情報幾何的性質: 誘導される計量および接続  
高岡 佑 (11:30) . . . . . 32
33. 時間空間分解発光分光による  $\text{InGaN/GaN}$  多重量子井戸の動的遮蔽効果の研究  
寺尾 顕一 (11:50) . . . . . 33
34. 単一イオン異方性をもつ XY 模型を用いた光格子中の強相関 Bose 原子気体が示す  
集団励起の減衰の解析  
長尾 一馬 (12:10) . . . . . 34

---

12:30~13:30 昼休み

---

35. 基板パターンに由来するネマチック液晶の二重安定性  
名倉 淳平 (13:30) . . . . . 35
36. 核磁気共鳴法を用いた金属ナノ粒子の研究  
西宮 大輔 (13:50) . . . . . 36
37. 走化性因子の添加で探るバクテリアの孤立波伝播のメカニズム  
長谷川大耀 (14:10) . . . . . 37

38. 重い電子系化合物 $\text{CeCoIn}_5$ エピタキシャル薄膜の STM/STS 測定	花岡 洋祐 (14:30) . . . . . 38
39. 一次元可逆セルオートマトンを用いた佐々形式の有効性の検証	深津 卓弥 (14:50) . . . . . 39

---

15:10~15:20 休憩

---

40. 超伝導体 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の核磁気共鳴・核四重極共鳴による研究	真砂 全宏 (15:20) . . . . . 40
41. アニオン/カチオン界面活性剤の混合系からなるリオトロピック液晶の 粘度異常現象と X 線構造解析	丸山 裕也 (15:40) . . . . . 41
42. SQUID アンプを用いた NMR 装置の開発	宮岡 慧 (16:00) . . . . . 42
43. 羽ばたき翼の編隊飛行における非定常流の解析	村上 遼 (16:20) . . . . . 43

16:40 終了

# 磁場下の多バンド超伝導の理論

凝縮系理論グループ 足立景亮

**Abstract** Recent experiments on iron selenide, supposedly a two-band superconductor, have been elucidating its anomalous characters in magnetic fields. This motivates us to theoretically investigate physical properties of two-band superconductors in a magnetic field. We find that the two-band structure can stabilize an unusual vortex lattice and enhance the superconducting-fluctuation effect.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

超伝導体の磁場応答は、物質に応じて実に多様な側面を見せる。転移温度以下 ( $T < T_{c0}$ ) で現れる超伝導状態において弱い磁場  $H$  を印加すると、超伝導体は完全反磁性を示す。さらに磁場を強くしていくと、基底状態は反磁性を伴う非一様な渦糸格子となり、対破壊磁場  $H_{c2}(T)$  が正常相に達する特徴的な磁場となる。特に、電子相関の強い超伝導体は、さらに興味深い磁場応答を示す。例えば  $\text{CeCoIn}_5$  では、電子対の軌道運動に起因した対破壊に加え、電子のスピン自由度に起因した対破壊 (常磁性対破壊) が重要となり、渦糸格子構造にも影響しうることが知られている。また銅酸化物超伝導体では、反磁性磁化や電気伝導度の上昇といった超伝導ゆらぎ現象が顕著で、超伝導転移が  $H_{c2}(T)$  線ではなく、渦糸格子融解線で起こるといふ相図に関する描像が確立した。

本研究で注目した超伝導体  $\text{FeSe}$  は、様々な実験結果がその特異性を物語っている [1]。まず、熱伝導度測定の結果から、高磁場では常磁性対破壊に起因して通常の渦糸格子とは異なった超伝導状態が実現しうると考えられている。さらに、最近観測された著しく大きな反磁性応答は、超伝導ゆらぎの効果が強められていることを示唆する。一方で量子振動やトンネル分光の実験によれば、 $\text{FeSe}$  は基本的に 2 バンド構造を有する。そこで、上に述べた  $\text{FeSe}$  の特異的な性質が、2 バンド構造を考慮することで理解できるかどうかを理論的に検討することは重要である。

このような背景の下、我々は磁場下における 2 バンド系の超伝導現象の解明に取り組んだ。すなわち、常磁性対破壊を考慮した平均場近似での超伝導相図、及び超伝導ゆらぎが誘起する反磁性応答の理論解析を行った [2]。その結果、2 バンド構造に起因した特徴として、高磁場下では特殊な空間変調を含んだ超伝導状態が出現しうることを発見し (Fig. 1),  $\text{FeSe}$  における未解明の状態の候補として提案した。さらに、2 バンド構造が超伝導ゆらぎの性質に大きく影響し、結果として反磁性応答が強められることを見出した (Fig. 2)。しかし、 $\text{FeSe}$  で観測された巨大な反磁性応答を定量的には再現しないことから、この物質には 2 バンド構造以外にも超伝導ゆらぎを強める要因が存在するはずであると結論した。

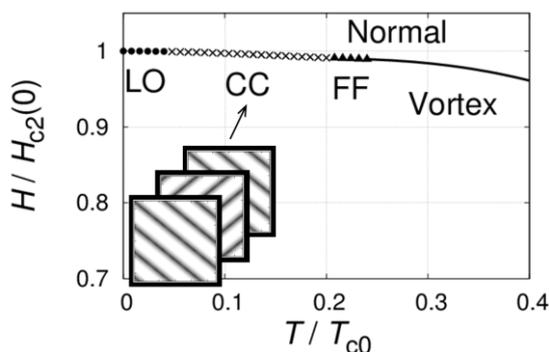


Fig. 1. Field-temperature phase diagram. LO, CC, and FF represent spatially modulated states. The spatial variation of the order parameter in CC state is shown (inset).

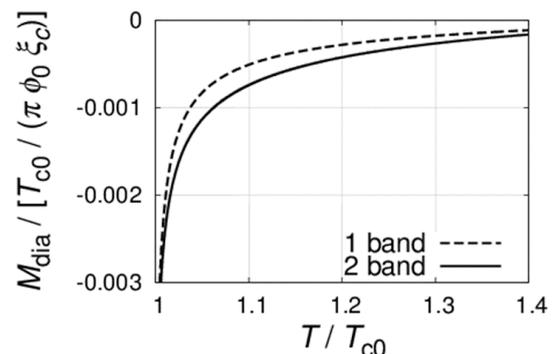


Fig. 2. Fluctuation-induced diamagnetic magnetization in a low magnetic field. The dashed and solid lines represent single-band and two-band cases, respectively.

## References

- [1] S. Kasahara *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **111**, 16309 (2014); S. Kasahara *et al.*, unpublished.
- [2] K. Adachi and R. Ikeda, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 064712 (2015); K. Adachi and R. Ikeda, submitted to PRB.

# 赤外分光による多孔性配位高分子 における水の吸着状態の研究

光物性研究室 市井智章

**Abstract** We studied adsorption state of water molecules in porous coordination polymer (PCP) with one dimensional-channel structure using infrared (IR) spectroscopy. We revealed the hydrogen bonding structure of adsorbed water below 4% RH and their important roles of guest water attraction.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

多種多様な骨格構造を自由にデザインできる多孔性配位高分子 (以下 PCP) は規則的なナノ細孔を有する結晶性吸着物質であり、適当な条件下で特定の分子を選択的に吸着・脱着することができる[1]。たとえば、近年合成された一酸化炭素のみを吸着する PCP は、これまで困難であった一酸化炭素と窒素の高効率な分離を行うことができ[2]、この選択的吸着は活性炭やゼオライトには見られない特異な機能である。しかし PCP ナノ細孔内における分子の状態や吸着メカニズムの詳細に関しては未解明な部分が多いのが現状であり、 $H_2$ 、 $H_2O$  といった水素原子を含むような分子の吸着状態は特に詳細が明らかとなっていない。これは、PCP における分子の吸着状態の主要な研究手法である X 線構造解析では、水素の位置特定が困難なためである。そこで本研究では、水素結合ネットワークを調べる上で強力な手法である赤外分光を用いて、一次元チャンネル構造をもつ PCP における水の吸着状態と吸着メカニズムを調べた。

本実験では PCP における吸着水の OH 伸縮振動の吸収スペクトルを測定した。OH 伸縮振動の固有周波数は、水素結合長に敏感に低周波シフトすることが知られており、水素結合の有無や強さを周波数位置から議論できる[3]。Fig.1 に OH 伸縮振動スペクトルの湿度依存性を示す。湿度 ~30% 程度ではブロードな OH 伸縮振動スペクトルが観測されているだけだが、湿度 4% 以下では①、②の二つの鋭い吸収ピークが現れている。特に①のピーク周波数位置は、この OH が水素結合を持たないことを示している。この赤外分光と X 線構造解析の結果を合わせることで、水分子は Fig.2 のように吸着されていることを初めて明らかにした。チャンネル内壁の酸素原子と水素結合した OH (HB-OH) と水素結合していない自由な OH (Free-OH) を有している。発表では、この吸着状態に関して、界面に存在する水分子との類似性や格子振動/分子間振動とのモード間結合などについて述べる。また重水を用いて、自由な OH がゲスト水の吸着の役割を果たすという吸着メカニズムも明らかにしたので詳細に議論する予定である。

## References

- [1] S. Kitagawa *et al.*, Chem. Int. Ed, **43**, 2334 (2004).
- [2] H. Sato *et al.*, Science **343**, 167 (2014).
- [3] A. Novak *et al.*, Structure and Bonding, **18**, 177 (1974).

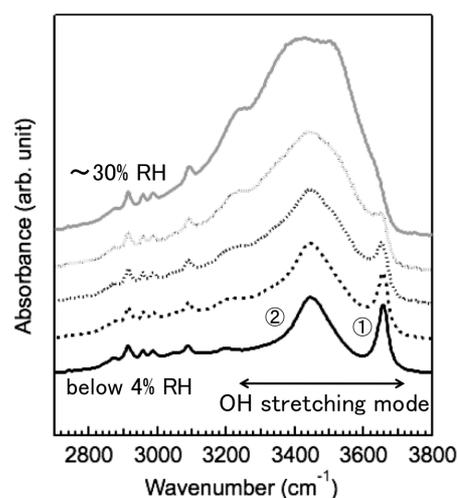


Fig.1 IR absorption spectra of adsorbed water molecules in PCP under different relative humidity (RH).

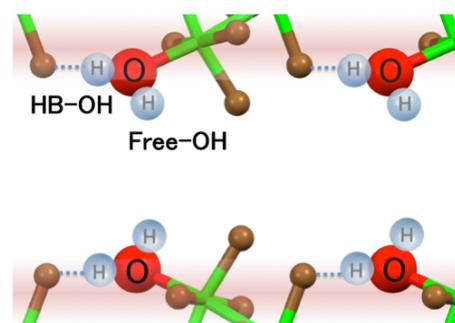


Fig.2 Hydrogen bonding structure of adsorbed water molecules in one-dimensional channel below 4% RH.

# 光 Lieb 格子を用いた副格子間の空間的断熱移送

量子光学研究室 一ノ瀬友宏

**Abstract** We realized inter-sublattice spatial adiabatic passage of matter wave for the first time by using atoms in an optical Lieb lattice which has close analogy with a 3-level system with  $\Lambda$ -type transitions. In addition, this enables us to prepare fermionic atoms only in the flat 2<sup>nd</sup> band.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

光格子中の冷却原子系を用いた量子多体系の量子シミュレーションの中で、近年、副格子などのより多くの自由度を持つ非標準型光格子の研究が盛んに行われている。これらの非標準型の格子には特殊なバンド構造を持つものがいくつかあるが、我々はその中でも平坦バンドと Dirac cone をもつ Lieb 型光格子 (Fig. 1) を研究している。この平坦バンドにフェルミオンを導入して、平坦バンド強磁性などの遍歴強磁性の研究を行うことが目標の一つである。また、Lieb 格子と同様に平坦バンドを持つカゴメ格子やのこぎり型格子では、Bose-Einstein 凝縮体を導入することにより電荷密度波と超流動が共存する超固体相が発現するという理論提案があり [1, 2]、Lieb 格子でも同様のことが期待される。

このように興味深い性質を示す平坦バンドが Lieb 型格子で存在するのは、Fig. 1 の A サイトに振幅を持たず、局在した固有状態が存在することによって由来している。Lieb 格子の固有状態は A, B, C の各副格子にそれぞれ局在した 3 つの状態の重ね合わせとして記述できるため、 $\Lambda$  型遷移で結ばれた 3 準位系と類似性を持っているが、この意味では平坦バンド上の状態は 3 準位系の Dark state に対応している。本研究ではまず、各副格子の占有数を測定する方法を考案し [3]、この手法と上記の類似性を利用することで、電磁誘起透明化 (EIT) に対応する副格子間のトンネリングの抑制を観測した (Fig. 2)。

さらに、Dark state を用いることで中間状態に原子を占有させることなく断熱的に 2 状態間をつなぐ誘導ラマン断熱遷移 (STIRAP) に対応して、空間的断熱移送 (SAP) [4] が可能になる。我々は、イッテルビウム原子のフェルミ同位体である <sup>171</sup>Yb において、Lieb 光格子の副格子間の SAP 現象を観測した (Fig. 3)。このような SAP は光では報告されているものの、物質波での SAP としては世界で初めてのものである。また、STIRAP の過程の中間点では Lieb 格子の平坦バンドに対応する状態が実現しており、これを利用してフェルミオンを平坦バンドだけに導入することにも成功した。

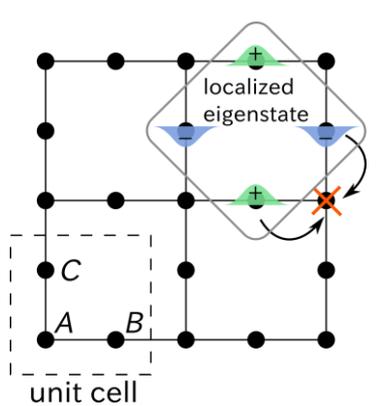


Fig. 1. Lieb lattice and sublattices. Wave function of localized eigenstate is also shown (upper right). Tunneling to A sites from B and C sites interferes destructively.

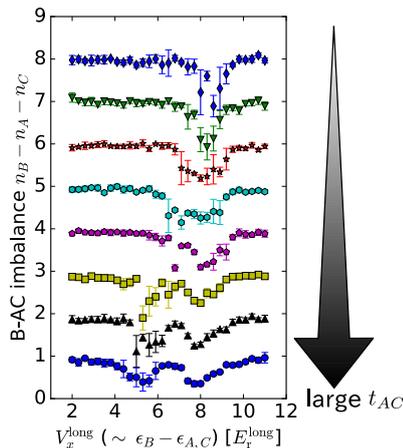


Fig. 2. Spatial analog of EIT. The dependence of tunneling from B site to A site on energy difference between B and A, C sites shows the splitting of resonant tunneling signal because of strong coupling  $t_{AC}$ .

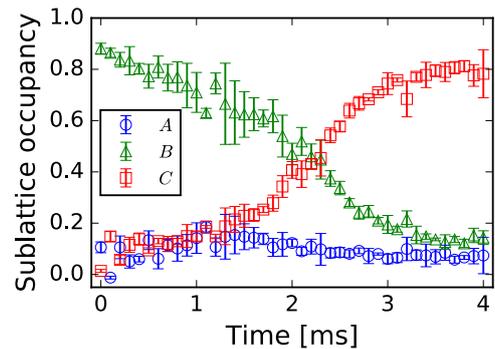


Fig. 3. Evolution of sublattice occupancy during SAP. Occupancy of A site is kept very low throughout the SAP from B site to C site.

## References

- [1] S. Hubar and E. Altman, Pys. Rev. B **82**, 184502 (2010).
- [2] T. Mishra, S. Greschner and L. Santos, Phys. Rev. B **92**, 195149 (2015).
- [3] S. Taie *et al.*, Sci. Adv. **1**, e1500854 (2015).
- [4] K. Eckert *et al.*, Phys. Rev. A **70**, 023606 (2004).

# 単一半導体ナノ粒子の発光明滅とスペクトル拡散

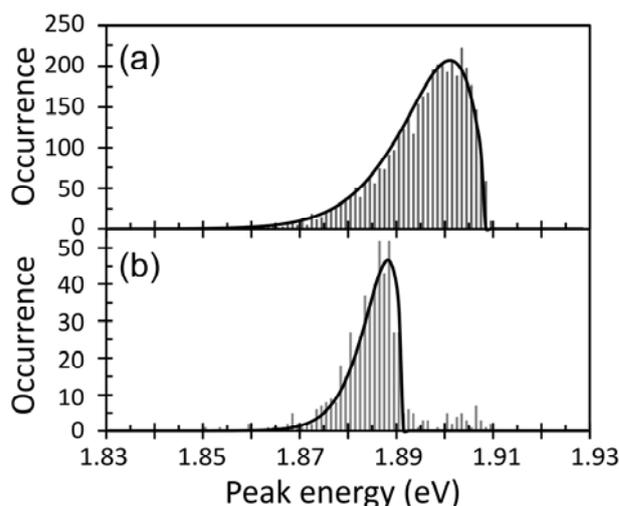
ナノ構造光物性研究室 伊吹博人

**Abstract** We studied photoluminescence blinking and spectral diffusion (SD) of single semiconductor nanocrystals. SD of exciton and trion emissions was observed. It was revealed that the trion emission exhibits unique SD characteristics reflecting a larger binding energy and smaller polarizability of trions when compared to those of excitons.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

半導体ナノ粒子は、電子・正孔の強い空間閉じ込めに起因したユニークな発光を示すため、基礎および応用の両面から活発に研究が行われている。ひとつのナノ粒子の発光を測定できる単一顕微分光によって、初めてナノ粒子の本質的な発光現象が明らかになる。単一ナノ粒子が示す光学現象に、発光明滅とスペクトル拡散がある。発光明滅は一定強度の光励起にも関わらず、発光強度が時間的に揺らぐ現象である。一方、スペクトル拡散は発光スペクトルのピークエネルギーや線幅が時間とともに変化する現象である。発光明滅およびスペクトル拡散の原因はナノ粒子内外に存在する余剰な電荷であると考えられている[1]。発光明滅とスペクトル拡散の相互関係を調べ、それらからナノ粒子内外の電荷の振る舞いを明らかにすることは、ナノ粒子の発光過程の根本的な理解につながると考えられる。

本研究では、単一半導体ナノ粒子の発光スペクトルの時間変化を測定し、発光明滅およびスペクトル拡散のメカニズムを議論した。発光波長 655nm 程度の比較的サイズの大きい CdSe/ZnS ナノ粒子において、エキシトン（中性励起子）発光由来の発光オン状態、トリオン（荷電励起子）発光由来の中間状態、そして非発光オフ状態の 3 状態からなる発光明滅と、スペクトル拡散による発光ピークエネルギーのシフトが観測された[2]。トリオン状態が形成あるいは消失するときに、エキシトン発光の大きなエネルギーシフトが見られた。これはトリオン状態の形成/消失の前後で粒子周囲の電荷の配置が変わり、電場強度が大きく変化することを反映している[3]。エキシトン発光およびトリオン発光は、粒子の周りの電荷による電場の影響を受け、それらのピークエネルギーは、量子閉じ込め Stark 効果によってレッドシフトする。時間分解された発光スペクトルからピークエネルギーを求め、そのエネルギーの頻度分布をまとめた結果を Fig.1(a)および Fig.1(b)に示す。低エネルギーに裾を引く非対称な分布の実験結果は、分極率と電場の揺らぎを考慮したシンプルなモデルから導出した関数（図中の黒線）でうまく説明できる。トリオン発光の最高エネルギーはエキシトン発光よりも十数 meV 程度低く、これはトリオンとエキシトンの束縛エネルギーの差を反映している。また、トリオン発光のエネルギーシフトの分布は幅が狭く、スペクトル拡散によるエネルギーシフトが小さい。計算結果から、これはトリオンがエキシトンよりも小さな分極率を有し、スペクトル拡散が抑制されるためであることが分かった[4,5]。



**Fig. 1** PL peak energy histograms of (a) the exciton and (b) trion emissions. The solid lines are best-fits of the theoretical distributions.

## References

- [1] M. J. Fernée, P. Tamarat, and B. Lounis, *Chem. Soc. Rev.* **43**, 1311 (2014).
- [2] 伊吹, 井原, 金光, 応用物理学会 2014 年秋季大会, 18a-A27-3.
- [3] 伊吹, 井原, 金光, 応用物理学会 2015 年春季大会, 11a-A10-5.
- [4] 伊吹, 井原, 金光, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 18pPSA-72.
- [5] H. Ibuki, T. Ihara, and Y. Kanemitsu, *SPIE Photonics West OPTO 2016*, 9758-30.

# Coupled Wire Construction and Modified Wilson Line

物性基礎論：凝縮系理論研究室 今村征央

**Abstract** Coupled Wire Construction has been proposed as a new method of systematically obtaining two-dimensional topological ordered states. In order to examine the bulk property, we introduce the Modified Wilson Line and show that the bulk effective theory is the Chern-Simons gauge theory.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

トポロジカル秩序相は相関効果が本質的に効く多体系であり、系の形状によって異なる基底状態の縮退や特殊な準粒子励起などによってトポロジカルな側面が現れる量子状態である。しかし実験的に観測されている例は分数量子 Hall 効果のみで、理論的にもミクロな観点からモデルを提案することは難しく、依然として例は少ない。

しかし近年、2次元トポロジカル相を系統的に構成する理論が提案されており注目を集めている。この手法は、多数の1次元系であるワイヤを2次元面に並べ、ワイヤ間の相互作用を導入することにより2次元トポロジカル相を構成することから、Coupled Wire Construction と呼ばれている。基本的な自由度として用意する1次元系の種類と、導入する相互作用の形をそれぞれうまく選ぶことで、様々なトポロジカル相を構成することができる[1, 2]。この方法により系統的に同じ手法でもってトポロジカル相の研究を行うことが可能になっており、今まで研究の難しかったトポロジカル秩序相の性質の解明および分類が可能になると期待される。

現在まで幾つかのトポロジカル相が実際に構成されると予想されているが、問題点として全ての例において、エッジの有効理論を導出してはいるものの、バルクの有効理論について言及されておらず、Coupled Wire Construction が擬1次元系を超えて真に2次元系が構成できているのかはわからなかった。我々の研究では、ワイヤ間の相関を調べるために Modified Wilson Line と名付けた物理量

$$\bar{\psi}_{j+1} \exp \left[ i \int_{ja}^{(j+1)a} dy \left( \frac{e}{\hbar} A_y + a_y \gamma_5 \right) \right] \psi_j$$

を導入し、バルクの有効理論が準古典近似の範囲内で Chern-Simons ゲージ理論になっていることを確認した。Chern-Simons ゲージ理論は多くのトポロジカル秩序相のバルクの有効理論として知られているものであるから、Modified Wilson Line を用いた解析によって Coupled Wire Construction が確かに2次元トポロジカル系を構成できていることを示されたことになる。

本発表では、トポロジカル秩序相の一つである分数量子 Hall 効果の Laughlin 状態を例にとり、Coupled Wire Construction の解説を行った後、Modified Wilson Line を用いたバルク理論の導出、さらにエッジ理論、準粒子の分数統計性、Landau 準位占有率の階層構造について示す。

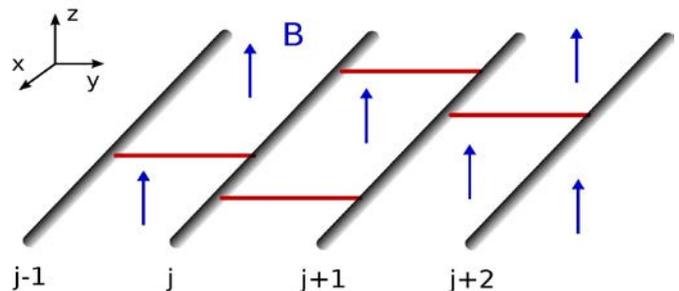


Fig. 1. An array of coupled wires in a perpendicular magnetic field. The wires interact with their nearest neighbors and the whole system becomes the Laughlin state.

## References

- [1] C. L. Kane, R. Mukhopadhyay, and T.C. Lubensky, Pys. Rev. Lett. **88**, 36401 (2002).
- [2] J. C. Y. Teo and C. L. Kane, Physical Review B **89**, 085101 (2014).

# 時間周期的に駆動される量子系の定常状態： 量子開放系と近藤模型の解析

凝縮系理論グループ 岩堀 功大

**Abstract** We investigate long time asymptotic states of periodically driven open systems analytically. In particular, we consider free fermionic systems which couple to a reservoir. Our results reveal that we can extract the properties of the system which are independent of the details of the reservoir.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

冷却原子系の人工ゲージ場や Floquet トポロジカル絶縁体に代表されるように、高強度・高周波の外場によって物性を制御可能であることが注目されている。固体系に対しては高強度レーザー光を照射することで、冷却原子系では光格子を時間周期的に変調させることで、外場照射前には系が持っていなかった性質を得ることができる。また、これらの現象は実験的に観測されている。

上記のような高強度・高周波外場による物性制御の成功によって、時間周期的に駆動される量子系の長時間ダイナミクスもまた注目を集めている。時間周期駆動系は Floquet 理論によって理論的に取り扱われる。この Floquet 理論は時間周期駆動系の長時間ダイナミクスが静的な有効ハミルトニアンによって記述できることを保障している。しかし、この事実は周期駆動系の長時間後の定常状態が静的な有効ハミルトニアンの熱平衡状態になることは保障しないため、定常状態がどのような性質を持つかは非自明な問題である。最近の研究により周期駆動される孤立系の定常状態の一般的な性質が明らかにされた。可積分系については時間周期的に拡張した一般化ギブス分布で表され [1]、マクロな非可積分系については、外場からエネルギーを吸収してしまい、最終的には温度無限大の状態になってしまうことが示された。しかし、高周波領域では、エネルギー吸収率は指数関数的に小さく、準定常状態として有効ハミルトニアンの熱力学が実現されることが示された [2]。

一方で、固体系などの熱浴と結合した周期駆動される量子系、量子開放系の定常状態の一般的な性質は分かっていない。時間に依存した外場がない時には詳細つり合いの式によって長時間後は熱浴の詳細に依らずギブス分布になることが保障される。しかし、時間周期駆動が入ると詳細つり合いの式が一般には成り立たなくなるため、一般に長時間後の状態がどのような性質を持つかは明らかではない。その一方で、最近の論文で、有効ハミルトニアンのギブス分布に緩和するための必要条件が提示された [3-5]。しかし、この条件は周期駆動系に対しても詳細つり合いの式が成立するための必要条件であり、熱浴と注目系の結合に fine tuning が必要となる。また、熱浴と注目系の結合に fine tuning がない時にどのような性質を持つかは明らかではない。

そこで、本研究では、熱浴と注目系の結合に fine tuning がない時の性質を明らかにすることを目標とし、特にエネルギー・粒子浴と結合した自由フェルミオン系の周期駆動の後に実現される状態の性質を調べた。ハイゼンベルクの運動方程式を解くことで時間発展を求め、Floquet 状態（有効ハミルトニアンの固有状態）の占有数や時間相関関数を求めた。そして、駆動外場の振動数が熱浴と注目系の結合のエネルギーカットオフ（同じことだが、熱浴のエネルギーカットオフ）に比べて十分大きければ、熱浴と注目系の結合の fine tuning は必要とせず、定常状態の低エネルギーの性質は有効ハミルトニアンのギブス分布の性質を一致することがわかった。この結果から、固体などの量子開放系で有効ハミルトニアンの熱力学的性質を得るためには、熱浴と注目系の結合のエネルギーカットオフを超えるような振動数を持つ周期外場を入れる必要があることが分かった。

## References

- [1] A. Lazarides, A. Das and R. Moessner, Phys. Rev. E **90**, 012110 (2014).
- [2] T. Mori, T. Kuwahara and K. Saito, arXiv: 1509.03968.
- [3] T. Shirai, T. Mori and S. Miyashita, Phys. Rev. E **91**, 030101 (2015)
- [4] D. E. Liu, Phys. Rev. B **91**, 144301 (2015)
- [5] T. Iadecola and C. Chamon, Phys. Rev. B **91**, 144301 (2015)

# WSe<sub>2</sub> 単層膜結晶の共鳴二次光学過程の研究

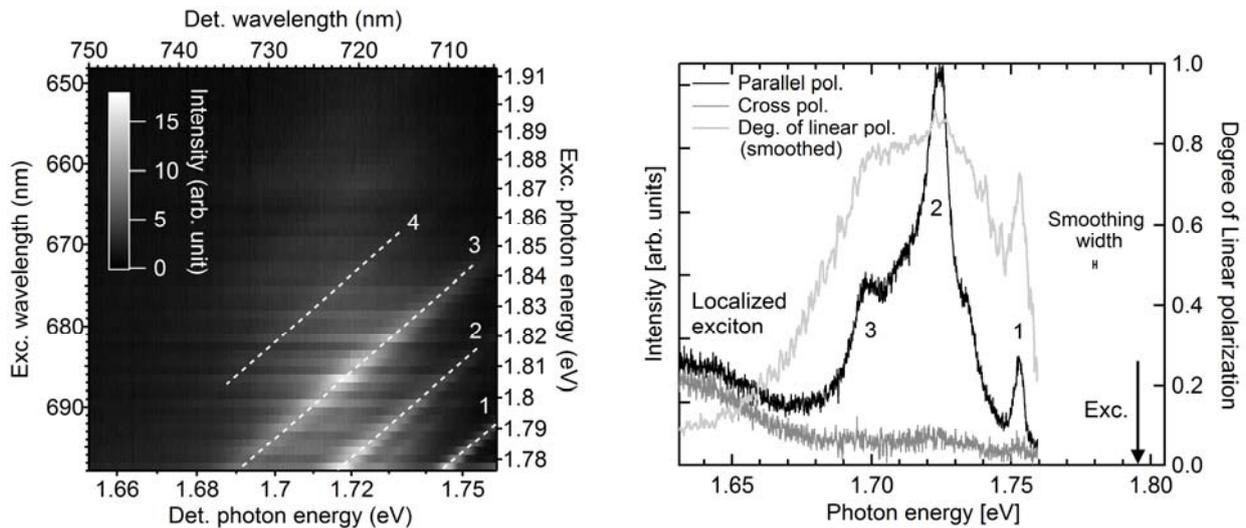
光物性研究室 草場 哲

**Abstract** We study resonant Raman scattering effect of the exciton luminescence in monolayer WSe<sub>2</sub>. The selection rule of the enhanced multiphonon Raman peaks suggests that resonant Raman scattering effect contributes the polarization memory in monolayer WSe<sub>2</sub>.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

単層二セレン化タングステン WSe<sub>2</sub> は Se 層, W 層, Se 層の 3 層により構成されるハニカム構造の物質であり、ブリルアンゾーンの K 点・K' 点に縮退した直接遷移型励起子を有する半導体である。タングステンの d 軌道による強いスピン軌道相互作用と空間反転対称性の破れにより、スピン自由度とバレー（電子バンドの”谷”）自由度がカップルしており、K 点と K' 点で円偏光選択則が異なる。これにより、円偏光励起下では励起子のバレー（スピン）偏極 < valley polarization > が生じ、励起子発光もこの偏りを反映して同じ円偏光を持つことが知られている [1]。さらに、直線偏光励起下においても、励起子発光は同じ直線偏光を持ち、これは両方のバレーの電子波動関数の重ね合わせ状態が保たれるためと考えられている < valley coherence > [2]。通常、励起から発光までの緩和過程でコヒーレンスなどの励起光の情報は失われるはずであり、それが保たれるメカニズムはまだ解明されていない。本研究では、波長可変光源を用いて化学気相成長法によりサファイア基板に成長した WSe<sub>2</sub> の偏光励起を行い、共鳴二次発光の偏光メモリに対する共鳴ラマン散乱効果を調べた。

Fig 1. に発光励起マッピング結果を示す。励起光を掃引すると 1.72eV 付近の A 励起子発光位置において、1 フォノンラマン散乱ピークからほぼ 30meV ごとにマルチフォノン散乱成分が観測された。これらは、ブリルアンゾーン端の複数の光学フォノンによるラマンピークであると考えられる。各ピークは A 励起子発光ピークの中心位置に来るときに最大となり、特に 3 フォノン散乱ピークの高さは A 励起子ピークに匹敵するほどに強く増強されている。これらのピークに対して偏光分解測定を行ったところ、Fig. 2 に示すように直線偏光・円偏光ともに高い偏光度を示した。これより、このような共鳴二次光学過程において共鳴ラマン散乱効果が偏光の記憶をもたらしている可能性が考えられる。



**Fig. 1.** PLE mapping of CVD monolayer WSe<sub>2</sub>. The number of related optical phonon is also shown. **Fig. 2.** Linear-polarization-resolved optical spectra.

## References

- [1] K. F. Mak *et al.*, Nature Nanotech. 7, 494-498(2012). H. Zeng *et al.*, Nature Nanotech 7, 490-493(2012). T. Cao *et al.*, Nature Commun. 3, 887(2012)
- [2] Aaron M. Jones, *et al.*, Nature Nanotech. 8, 634-638 (2013)

# 光格子中イッテルビウム原子の量子気体顕微鏡の実現

量子光学研究室 久野拓馬

**Abstract** We develop an ytterbium quantum gas microscope with a short lattice constant of 266nm. In this work, we demonstrate site-resolved imaging of bosonic isotope of  $^{174}\text{Yb}$ . In addition to fluorescence image, we successfully detect a single atom with single site resolution by Faraday effect.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

光格子中に導入された冷却原子は強相関電子系を記述するハバードモデルを極めて理想的に再現でき、かつ非常に高い制御性を有する。そのため光格子中の冷却原子でハバードモデルを実装し、強相関電子系をシミュレートする研究（量子シミュレーション）が世界中で盛んに行われている。その中でも特に新しいタイプの量子シミュレーターとして、冷却原子を単一格子点の分解能で観測する量子気体顕微鏡(quantum gas microscope:QGM)が2009年に開発された[1]。QGMの実現により局所的な情報を得ることや量子ダイナミクスを観測することが可能となり、実際、アルカリ原子を用いたボース粒子やフェルミ粒子の Mott 絶縁体相の観測[2, 3]やダイナミクスの研究[4]が報告されている。

本研究において、我々はアルカリ原子と異なり高いスピン対称性やユニークなエネルギー構造を持つ2電子系のイッテルビウム原子(Yb)に着目した。ただし、Yb原子はこれまでQGMが実現されてきた原子種に比べて質量が重いため、実験のタイムスケールでホッピングが起こるには格子間隔のより短い光格子を用意しなければならない。我々は266nmという格子間隔の短い光格子を導入し、高い開口数の対物レンズを用いて高分解能のイメージングを達成した。特に、 $^{174}\text{Yb}$ （ボース同位体）に対して発光イメージ中にドップラー冷却とサイドバンド冷却を行うことで長い発光寿命( $\sim 7\text{s}$ )を確保し、高い Fidelity で原子の空間分布を知ることに成功した[5]。

さらに光格子中単一原子のイメージング手法としてファラデー効果を利用した観測（ファラデーイメージ）に世界で初めて成功した。ファラデーイメージでは原子とプローブ光の分散型相互作用に基づいて生じた変化を検出する。まず、我々は偏光ビームスプリッターを用いてプローブ光を除き、入射プローブ光と直交した偏光成分の散乱光のみを取り出すことで発光イメージと同程度の Fidelity で原子の空間分布を確認した（ダークフィールドイメージ）(Fig. 1)。また、直線偏光で入射したプローブ光の偏光回転を検出することでも単一原子観測に成功した(Fig. 2(a))。この場合の特徴として散乱光電場の2乗を観測する発光イメージやダークフィールドイメージとは異なり、散乱光電場に比例した点像分布の形状が得られることが挙げられる(Fig. 2(b))。またプローブ光の離調を大きくとることで発光イメージの場合よりも原子の加熱を抑えて原子の空間分布を知ることができるため、より非破壊な測定が可能となり、今後様々な面での応用が期待される。

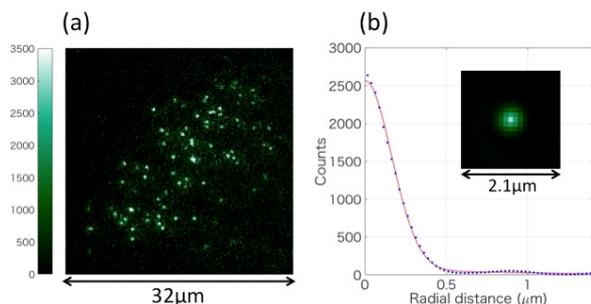


Fig. 1. (a) Image of a sparse atom cloud. (b) Averaged image from single atoms and its radial intensity profile.

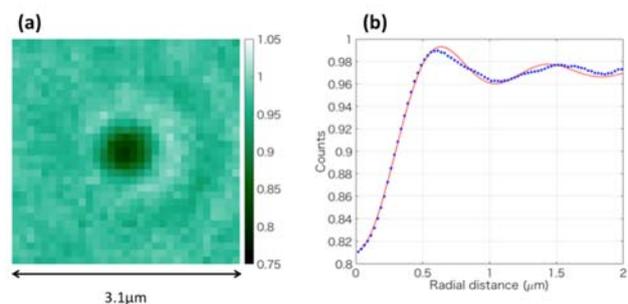


Fig. 2. (a) Averaged image from single atoms and (b) its radial intensity profile.

## References

- [1] W. S. Bakr *et al.*, Nature **462**, 74–77 (2009) [2] J. F. Sherson *et al.*, Nature **467**, 68–72 (2010)  
[3] D. Greif *et al.*, arXiv:1511.06366 (2015) [4] T. Fukuhara *et al.*, Nature Physics **9**, 235–241 (2013)  
[5] R. Yamamoto *et al.*, arXiv:1509.03233 (2015)

# 流体方程式に対する境界条件の微視的理解

非線形動力学研究室 高木裕義

**Abstract** We study non-equilibrium dynamics of a fluid near a solid surface by considering a Hamiltonian particle system. In the first part, we show that a macroscopic slip emerges as the result of a non-linear relation between the shear stress and the velocity at the surface. In the second part, we report a singular behavior which may suggest a non-equilibrium phase transition.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

流体が示す動的な振る舞いは、適切な境界条件下におけるナビエ・ストークス方程式の解によって高い精度で記述される。このとき、速度場に対しては、固体表面での流体が相対的に静止するという境界条件が課される[1]。これはスティック境界条件とよばれ、固体表面で流体の滑りが無いことを意味する。一方、近年、Granick らのグループにより、原子的に滑らかな固体表面を用いたサブマイクロスケールの実験が行われ、スティック境界条件の破綻、即ち、固体表面における流体の滑りが観測された[2]。この実験結果は流体方程式における境界条件の非自明さを示している。そこで、本研究は、固体表面での流体の滑りの有無を規定する境界条件を原子分子の微視的力学の立場から理解することを目標に掲げる。

本論文では、固体表面と流体を含む全系を3次元古典ハミルトン多粒子系として表現し、そのモデルを数値的・現象論的な方法で解析する。バルクの粒子は2つの固体表面の間を互いに相互作用しながら運動する(図1)。下端の固体表面の模型として周期的に配置された質点を考え、バルクの粒子はその質点とも相互作用する。上端の固体表面近傍で一定の流れを加え、せん断流を引き起こし、このときの下端固体表面近傍での定常的な流れに着目する。

前半ではマクロなスケールの実験において観測されうる流体の固体表面における滑り、即ち、スリップ境界条件の可能性を議論する。まず、これまでに精力的に研究されてきた固体表面におけるせん断応力と流速の線形応答に注目する限り、スリップ境界条件を示すマクロな系を考えることが出来ないことを示す。そこで、固体表面におけるせん断応力と流速の非線形関係を仮定し、マクロな滑りが生じる条件を調べる。その結果、せん断応力の取りうる値に制限が加わる場合に、マクロな滑りが生じることが分かる。また、そのような非線形関係を示す固体表面の模型を提案する(図2)。

後半では、この模型が示す特異的な現象を議論する。ある特定の固体表面を選んだ数値計算では、固体表面における流速が初期条件に依存していくつかの異なる値を取るという現象が観測される。また、固体表面における流速を変化させた時、せん断応力が不連続に変化しているように見える現象も観測される。これらを非平衡相転移あるいは臨界現象として捉えられる可能性について考察する。

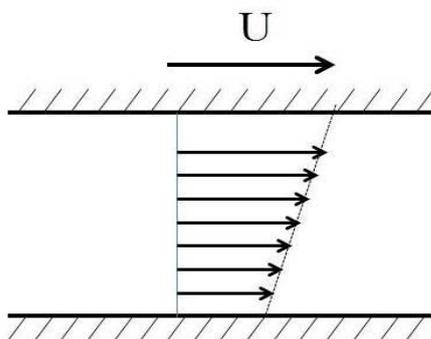


図1 モデルの概観

上端の固体表面近傍では一定の流れ  $U$  が加えられ、  
下端の固体表面近傍での振る舞いが注目される。

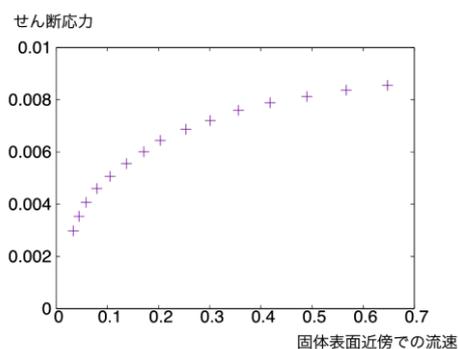


図2 固体表面における流速とせん断応力の関係  
上限値を持つ振る舞いが見られる。

## References

- [1] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, Fluid Mechanics, (Pergamon Press Oxford, 1959).
- [2] Y. Zhu and S. Granick, Phys. Rev. Lett. 87. 096105(2001).

# トポロジカル近藤絶縁体における 光誘起相転移

凝縮系理論研究室 高三和晃

**Abstract** We theoretically investigate how laser fields change the nature of topological Kondo insulators (TKIs). Using Floquet theory, we derive the effective model of TKIs under the laser irradiation and discuss its topological properties. We demonstrate a possible realization of photo-induced Chern insulators and photo-induced Weyl semimetals.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

レーザー光によって固体中の電子や格子振動を駆動して光誘起相転移を引き起こし、非平衡下で新たな物質相を実現させる研究が、近年のレーザー技術の発達に伴って盛んに行われている。例えば、円偏光レーザーを照射したグラフェンでは、トポロジカル相転移が起こり量子 Hall 状態になることが提案された[1]。また、強相関電子系において高強度レーザーパルス照射することで電子の局在化が起こり、金属-絶縁体転移が起きることが明らかにされた[2]。

我々はトポロジカル物質や強相関電子系における光誘起相転移の研究を受け、トポロジカル近藤絶縁体[3]に対してレーザーを照射するとどのような光誘起相転移が起こりうるかを調べた。トポロジカル近藤絶縁体は、現在知られている多くのトポロジカル物質と異なり、局在電子における電子相関(近藤効果)が重要な役割を果たす  $f$  電子系である。SmB<sub>6</sub> という有力な候補物質を対象に理論・実験ともに精力的に研究が行われている。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。

まず、2次元のトポロジカル近藤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 Chern 絶縁体(量子 Hall 状態)が実現されることが分かった。トポロジカル数  $C$  のレーザー強度に応じた変化を調べ、光によって誘起されるトポロジカル相転移の様子を明らかにした (Fig.1) [4]。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 (Fig.2) [4]。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できる。

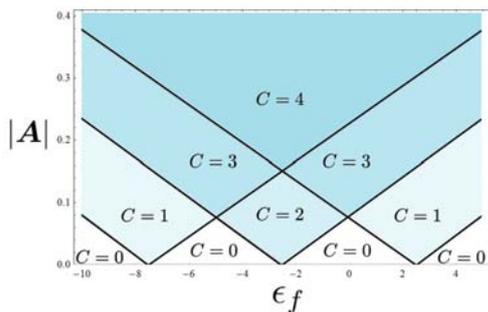


Fig. 1: Topological phase diagram of our effective model in 2D case.

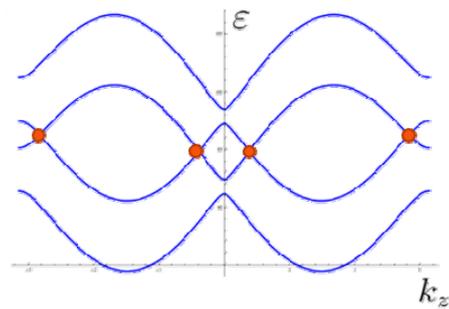


Fig. 2: Calculated band structure corresponding to Weyl semimetallic phase.

## References

- [1] T. Oka and H. Aoki, Phys. Rev. B, **79**, 081406 (2009).
- [2] T. Ishikawa et al. Nat. Commun. **5**, 5528 (2014).
- [3] M. Dzero, K. Sun, V. Galitski, and P. Coleman. Phys. Rev. Lett. **104**, 106408 (2010).
- [4] K. Takasan, M. Nakagawa, and N. Kawakami arXiv : 1509.04840.

# 重い電子系トリコロール超格子における グローバルな空間反転対称性の破れ

固体電子物性研究室 戸田 琳太郎

**Abstract** By using a molecular beam epitaxy technique, we fabricated a novel type of superconducting superlattices which consist of one superconducting layer and two normal metallic layers. In this “tricolore” superlattice, “global” inversion symmetry breaking with no mirror plane is introduced, which is revealed by the suppression of Pauli limit of upper critical field.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

近年、空間反転対称性の破れた系における超伝導が注目を集めている。これらの系においては、スピニングレット状態とスピントリプレット状態の混成やヘリカル渦糸状態などの特異な超伝導状態の実現が示唆されている[1]。

結晶構造に起因して空間反転対称性が破られている超伝導体には  $\text{CePt}_3\text{Si}$  や  $\text{CeRhSi}_3$  などが存在するが、このような自然界に存在する物質の数は限られており、また空間反転対称性の破れ (ISB, Inversion Symmetry Breaking) の度合いを制御することができない。そのため、ISB が物性に与える効果を系統的に評価することは困難であった。

我々の研究グループでは最近、重い電子系超伝導体と非磁性通常金属を1種類ずつ用いた超格子を人工的に作製し、超伝導層と非磁性金属層の層数を制御することによりこの超格子に空間変調を与えることに成功した[2]。これらの研究により、超伝導ブロック層の上端と下端における局所的な ISB (『ローカルな』ISB) の影響が明らかとなった。本研究では、重い電子系超伝導体1種を2種の異なる非磁性通常金属で挟み込んだ超格子(トリコロール超格子)を作製することにより、積層方向に鏡映面の存在しない ISB (『グローバルな』ISB) を導入することを試みた (Fig. 1)。

本研究では重い電子系超伝導体として  $\text{CeCoIn}_5$  を、非磁性通常金属として  $\text{YbCoIn}_5$  と  $\text{YbRhIn}_5$  を用い、分子線エピタキシー法によってこれら3種の金属を交互に積層させた  $\text{YbRhIn}_5/\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5$  超格子を作製した。この超格子では、3種の金属の層数を制御することによってグローバルな ISB の効果を系統的に評価することが可能である。Fig. 2 では今回作製したトリコロール超格子の  $H_{c2}/H_{c2}^{\text{orb}}$  (上部臨界磁場を軌道対破壊効果による上部臨界磁場により規格化したもの) の温度依存性を示す。ISB の効果が強いほどパウリ対破壊効果が抑制され、パウリ効果を排したモデルである WHH プロットに近づく振る舞いを見せる。これから、超伝導層の厚みが等しい超格子であるにも関わらず、グローバルな ISB が実現している今回のトリコロール超格子はローカルな ISB しか実現していない従来の超格子よりも、パウリ対破壊効果の抑制度合いが強いことが分かった。この結果は、ローカルな ISB の効果に加えてグローバルな ISB の効果が超伝導に影響を及ぼしていることを示している。

## References

- [1] S. Fujimoto, J. Phys. Soc. Jpn. **76** 5 (2007)  
 [2] M. Shimozawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92** 027003 (2004).

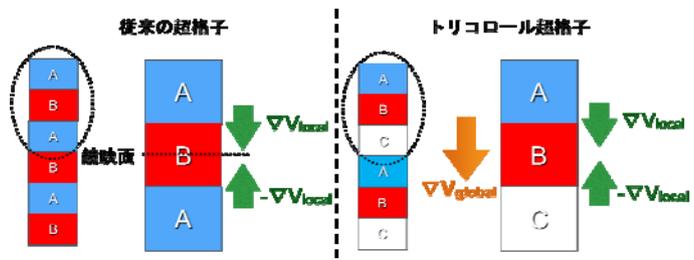


Fig. 1. Construction of an usual superlattice (left side, a bicolore superlattice) and a tricolore superlattice (right side).

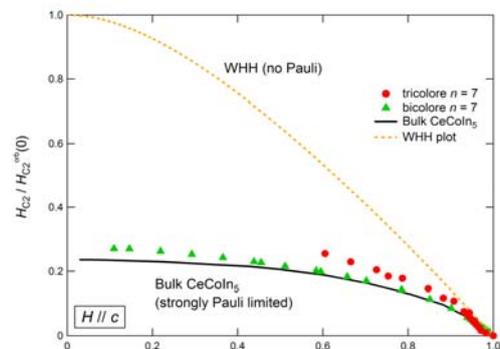


Fig. 2. Dependence of  $H_{c2}$  and  $T$  for a tricolore superlattice compared with that for a bicolore superlattice.

# 散逸により誘起される光格子中 Bose 気体の強相関状態

量子光学研究室 富田 隆文

**Abstract** We observe atom loss suppression induced by strong dissipation due to inelastic collision using metastable atoms of ultracold ytterbium in a 3D optical lattice. We also observe dissipation-induced shift of transition point of Mott insulator-superfluid transition. This behavior is consistent with the mean-field analysis considering the dissipative process. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

最近、量子断熱計算に基づいた量子計算が注目を集めている。我々は、高い制御性を持つ光格子中の冷却原子の可能性に着目し、現在、大きな磁気モーメントを持つ極低温の原子集団を光格子中に導入し、量子断熱操作である量子アニーリング[1]を適用することにより、この系に現れることが期待される磁気双極子相互作用由来の磁気秩序相を観測するプロジェクトを進めている。このプロジェクトでは、大きな磁気モーメントを持つ原子状態としてイッテルビウム(Yb)原子の Bose 同位体である  $^{174}\text{Yb}$  原子の準安定電子励起状態  $^3P_2$  状態を用いることを計画している。今回、光格子中の  $^3P_2$  状態  $^{174}\text{Yb}$  原子について、散逸により誘起される興味深い現象を観測することに成功した。

先行研究により、 $^3P_2$  状態の寿命は、主に原子同士の非弾性衝突による 2 体ロスで決定されることが知られている[2]。特に、 $^3P_2$  状態の非弾性衝突レートは高く、光格子中でサイト間の原子のトンネリングにより 1 サイトに 2 つの原子が存在する状況が起きれば、直ちに非弾性衝突が生じロスとなる。このことから、まず、系の安定性を確認するため 3 次元光格子中における  $^3P_2$  状態のロスレートを測定した。その結果、実際にはロスレートはトンネリングレートに比べて 1~2 桁程度小さく、量子アニーリング実験を行うにあたり十分安定であることを確認した(Fig. 1)。この現象は、トンネリングの結果生じる非弾性衝突という強い散逸の効果により、トンネリングによる状態変化自体が抑制される量子ゼノ効果として説明される[3]。このように、隣接サイトの原子との非弾性衝突という散逸により、隣接サイトへのトンネリングが抑制されるという強相関状態が誘起されていることを確認した。

さらに、この結果を踏まえ、2 体ロスの効果が、光格子中のボース気体において特徴的である Mott 絶縁体-超流動相転移に対しても影響を与えると考え、 $^{174}\text{Yb}$  原子  $^3P_2$  状態の相転移の振舞いを観測する実験を行った。光格子中での  $^3P_2$  状態の原子の振舞いを Time-of-Flight (TOF)法により観測し、散逸の無い系 ( $^1S_0$  状態)と比較して、相転移点が光格子ポテンシャルの浅い方へシフトしていることを明らかにした(Fig. 2)。これは、通常の原子間相互作用による効果に加え、強い散逸の影響で生じた相関によりトンネリングが抑制された結果、光格子ポテンシャルの浅い領域においてもなお Mott 絶縁体状態のまま留まっていることを示している。また、この実験で見られた相転移点のシフトの振舞いは、散逸の影響を取り入れた平均場近似による理論的解析[4]とも概ね一致した。

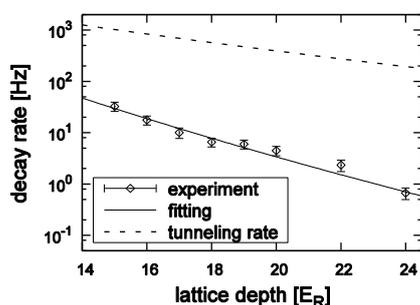


Fig. 1. Two-body loss rate of the  $^3P_2$  state in a 3D optical lattice. The observed loss is much smaller than the tunneling rate because of the strong dissipation.

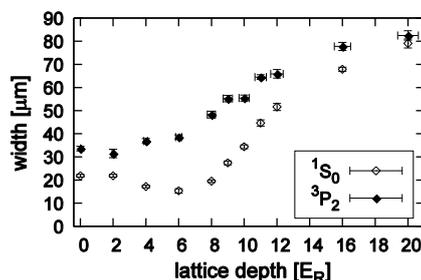


Fig. 2. Peak width of the TOF images of atomic cloud. The data of the  $^3P_2$  state reveal the shift of the transition point from that of  $^1S_0$  state which has no inelastic two-body collision.

## References

- [1] T. Kadowaki and H. Nishimori, Phys. Rev. E **55**, 5855 (1998).
- [2] S. Uetake *et al.*, Phys. Rev. A **86**, 032712 (2012).
- [3] N. Syassen *et al.*, Science **320**, 1329 (2008).
- [4] Y. Ashida, private communication.

# 非弾性 X 線散乱実験による 低密度液体 Rb のプラズモン測定

不規則系物理学研究室 萩谷透

**Abstract** We measured inelastic X-ray scattering spectra of liquid Rb to determine the plasmon dispersion. The plasmon line width at high temperatures tends to be narrower than that at the melting point. We compared the experimental results with theoretical plasmon line width, and found that the effect of interband transition on the plasmon lifetime was reduced with decreasing density.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

アルカリ金属液体中の伝導電子は、融点近傍においてほとんど自由な電子ガスとして記述することができる。しかし、アルカリ金属液体を気-液共存線に沿って低密度化する(昇温する)と、膨張するにも関わらず最近接原子間距離が減少し、密度揺らぎが増大するような構造不均質性が観測されている[1]。このような不均質性が生じる過程は、低密度電子ガスにおける負の圧縮率[2]が関係していると示唆されている。

我々これまで、液体 Rb の電子状態について直接的な情報を得るため、プラズモン励起スペクトルを測定してきた。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や線幅から、電子系の圧縮率などの電子間相互作用に関して有用な情報を得ることができる。融点近傍での測定から、固体において顕著だったバンド間遷移によるプラズモン分散の変化が、液体状態において低減され、伝導電子がより電子ガスに近づくことが示唆された[3]。本研究では、さらに低密度領域において、液体 Rb のプラズモンを観測することにより、バンド間遷移の役割の変化を調べ、伝導電子の相互作用に関する情報を取り出すことを試みた。

実験は、SPring-8 の BL12XU において実施した。入射 X 線エネルギーは 13.8 keV で、0.5~6.5 eV のエネルギー移行領域において、300 °C から 1000 °C における液体 Rb の非弾性散乱スペクトルを測定した。Fig. 1 に 60 °C, 500 °C におけるプラズモン線幅を示す。融点近傍の 60 °C と比べて、より低密度の 500 °C においては線幅が狭くなり、プラズモンの寿命が長くなっている。このことは、バンド間遷移の影響によるプラズモンの減衰が、低密度化に伴って低減されることにより説明できると、線幅の理論式[4]との比較から分かった。また、プラズモン励起エネルギーを決定し、電子ガスモデルとの比較を行った。低密度化に伴って、実験と電子ガスモデルの励起エネルギーの差が小さくなり、バンド間遷移の効果が低減されてより電子ガスの状態に近づくことが示唆された。また、500 °C 以下の温度においては正のエネルギー分散を示していたが、800 °C においてはそれまでの温度と異なり、平坦な分散を示した。更に本研究では、プラズモンのエネルギー分散関係から、低密度液体 Rb の電子状態について、詳細に議論する。

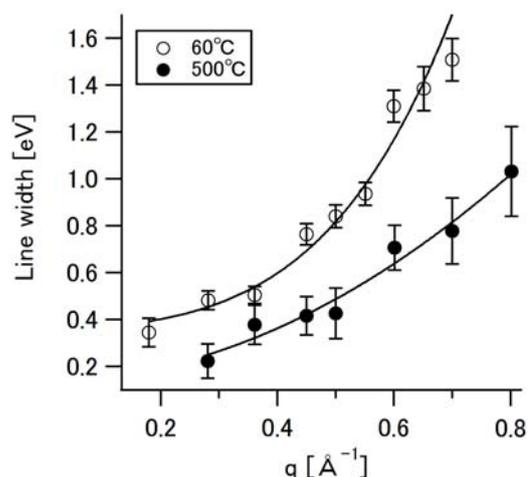


Fig. 1. Plasmon line width in liquid Rb. The plasmon line width at 60 °C is the experimental results in Ref. [3]. The solid lines are guides for the eye.

## References

- [1] K. Matsuda, K. Tamura, M. Inui, Phys. Rev. Lett. **98**, 096401 (2007).
- [2] G. Giuliani and G. Vignale, *Quantum Theory of the Electron Liquid* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2005).
- [3] K. Kimura, K. Matsuda, N. Hiraoka et al. Phys. Rev. B. **89**, 014206 (2014).
- [4] K. Kimura, K. Matsuda, M. Yao, J. Phys. Soc. Jpn., **82**, 115001 (2013).

# 定常外力下の二次元流れにおける空間局在ダイナミクス

流体物理学研究室 蛭田佳樹

**Abstract** To elucidate spatially-localized turbulence, we have numerically investigated a two-dimensional forced flow. We have found various solitary solutions: from stationary to turbulent ones which are called spatially-localized dynamics and considered as crucial in recent turbulence research. Novel phenomena such as "elastic collision" and a school of localized turbulence are observed.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

高レイノルズ数の流れでは、多種多様なスケールの運動や現象が非定常に共存し相互作用する乱流状態が実現する。過去、乱流の基礎研究は主に統計的に一様な流れを対象として行われてきた。その結果として、発達した乱流中の普遍的統計則の発見などの成果を上げてきた。しかしながら、乱流層流遷移時に見られる乱流領域と層流領域が共存した流れ [1] や高レイノルズ数で見られる強い空間間欠性をもつ乱流 [2] などに代表される空間的非一様性を特徴とする乱流現象も存在する。このような非一様乱流は、近年計算機上で詳細に再現できるようになり急速に関心を集めている。乱流層流遷移では空間的に局在した特徴的な構造、例えばパイプ流で観測されるパフやスラグ、平行平板間流れにおける乱流斑点などが果たす役割の重要性が明らかになってきた [3,4,5]。これらの局在乱流状態を含め、流体中の限られた領域でのみ時空変動する局在構造は局在ダイナミクスとよばれる。

本研究では乱流の非一様性、とくに局在ダイナミクスに着目し、非一様性の起源やそれがもたらす性質を明らかにすることを目的とする。この目的のために局在ダイナミクスを実現するより単純で解析が容易な流体系を提案し、この系を詳細に調べる。まず、周期箱中の二次元非圧縮性ニュートン流体の定常外力系である Kolmogorov 流に流量を導入して拡張し、基準系となることを示す。外力に垂直な方向の流量は、この系を支配する保存量となり、局在ダイナミクスやそれらの相互作用に大きな影響を及ぼす [6]。次に、弱非線形解析を用いて局在構造に対応する homoclinic 軌道が層流の不安定性による空間対称性の破れによって出現することを説明する。

本研究の後半では、スペクトル法を用いた直接数値計算により得られた、複雑化した局在ダイナミクスの新奇で多様な振る舞いを概観する。得られた新奇な現象の例として、局在ダイナミクス間の"弾性衝突"(Fig.1 Left) や局在乱流 (Fig.1 Right) を示す [6]。さらに局在乱流領域が複数ある場合の相互作用の詳細や、乱流層流遷移に関する試験的な結果も報告する。

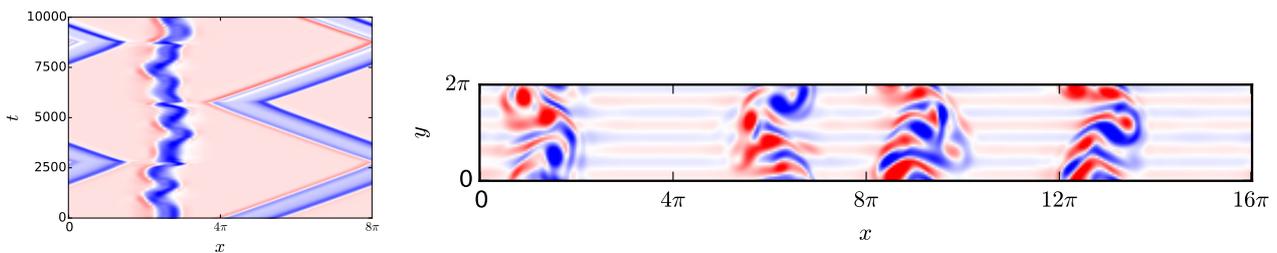


Fig.1 (Left) The variation in vorticity in an  $(x,t)$  plane for  $y = \pi/16$  at  $Re=20$ . A travelling wave collides with a spatially-localized periodic state and changes its travelling direction. (Right) A snapshot of vorticity at  $Re=50$ . Turbulent regions (dark) and laminar regions (light layers) are spatially separated.

## References

- [1] O. Reynolds, Phil. Trans. R. Soc. Lond., **174**, 935 (1883).
- [2] T. Ishihara *et al.*, Annu. Rev. Fluid Mech., **41**, 165 (2009).
- [3] A. P. Willis *et al.*, Phil. Trans. R. Soc. A, **366**, 2671 (2008).
- [4] G. Kawahara *et al.*, Annu. Rev. Fluid Mech., **44**, 203 (2012).
- [5] M. Avila *et al.*, Phys. Rev. Lett., **110**, 224502 (2013).
- [6] Y. Hiruta and S. Toh, Phys. Rev. E, **92**, 063025 (2015).

# 2次元 Ising 系の界面ダイナミクスの研究

非平衡物理学研究室 増本雄亮

**Abstract** We investigated interface dynamics in the two-dimensional Ising model. By numerical computation, we confirmed that dynamics of the interface in mean magnetizations of each column is normal diffusion and that the continuous SOS model can reproduce the mean-square displacement and the probability distribution of interface positions.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

転移温度以下の 2 次元 Ising モデルに対し、 $x$  軸方向の両端に互いに逆向きの磁場をかけ、 $y$  軸方向は周期境界条件を取ると、Fig. 1 のように + スピンと - スピンの境界が形成され、その境界は左右に確率的に動く。このような界面の運動は興味深い。2 次元 Ising 界面系については、界面をもつ初期条件から磁場をかけた状態での界面の動きを考えると、結晶成長と同様に界面はゆらぎながら一方向に動き、その運動は KPZ 方程式で記述される事[1]や、前述のように磁場をかけない場合は、界面の幅が  $t^{1/4}$  で増加する事[2]、磁化プロファイルの幅が低温で SOS モデルに一致する事[3]等が知られている。本研究では、界面の拡散的な運動に着目し、拡散係数やダイナミクスを記述する方程式について考察する。

一次元系では、異なる密度の相の境界がランダムウォークするとき、ある一点における密度の時系列パワースペクトルが  $-1.5$  乗のべき則に従う事が簡単な計算から分かる[4]。我々はこの事実を 2 次元系に応用し、1 点  $(x, y)$  におけるスピン  $S_{x,y}(t)$  の時系列や、その  $y$  軸方向の平均  $M_x(t) = L_y^{-1} \sum_y S_{x,y}(t)$  ( $L_y$  は  $y$  軸方向の長さ) の値の時系列を考え、それらのパワースペクトルを解析する事で界面ダイナミクスの性質を捉えることを試みた。その結果、Glauber ダイナミクスで時間発展させた時の  $S_{x,y}(t)$  のパワースペクトルでは低周波数部分で  $-1.5$  乗則が見え、ある時間スケールで見ると界面のダイナミクスは正常拡散であると分かった。これを  $M_x(t)$  のパワースペクトルと比較すると、低周波数部分では一致するが、高周波数部分は  $M_x(t)$  のパワースペクトルの値より大きくなるという結果を得た。この違いは、 $y$  軸方向で平均を取る事で、高周波数モードの情報が落ちる事を意味している。 $M_x(t)$  のパワースペクトルは、ある幅を持つ界面がランダムウォークをすると考える事で、[4]と同様の計算から求めることができ、平均二乗変位から数値的に得られる拡散係数を用いる事で定量的な一致を得た。また、低温かつ  $L_y$  が小さい場合は、Ising のマスター方程式から解析的に拡散係数を算出する事もできた。

次に、より界面を 2 次元的に捉えるために、界面の位置を変数とする確率モデルを考えた。2 次元 Ising 界面系の数値計算の結果、低温の場合の位置分布は、 $P(x_i - x_{i+1}) \propto \exp(-a|x_i - x_{i+1}|)$  のようになる ( $x_i$  は  $i$  行の界面の位置を表す連続変数)。そこで、定常分布がこのような形になるような SOS モデルの連続変数版である確率過程

$$\dot{x}_i = -k\{\text{sgn}(x_i - x_{i+1}) + \text{sgn}(x_i - x_{i-1})\} + R(t), \quad \langle R(t)R(t') \rangle = 2k/a\delta(t - t')$$

( $\text{sgn}$  は符号関数、 $R(t)$  は白色ガウスノイズ) を考えると、この分布や平均二乗変位の時間発展をよく再現できる事が分かった。特に低温かつ  $L_y$  が大きい場合には、Ising のマスター方程式から、拡散係数や上式の  $k$  も解析的に算出できた。Fig. 2 は解析的に求めた  $k$  と拡散係数を用いて上式を数値計算して得られた平均二乗変位と 2 次元 Ising 系の平均二乗変位を比較したものである。

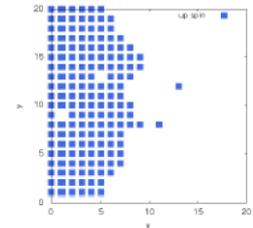


Fig. 1. The snapshot of 2d Ising model

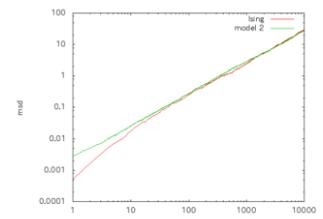


Fig. 2. The mean-square displacement

## References

- [1] A.-L. Barabási and H. E. Stanley, “Fractal concepts in surface growth” (Cambridge University Press, 1995).
- [2] D. Stauffer and D. P. Landau, Phys. Rev. B **39**, 9650 (1989).
- [3] J. Stecki, A. Maciolek, and K. Olausson, Phys. Rev. B **49**, 1092 (1994).
- [4] S. Takesue, T. Mitsudo and H. Hayakawa, Phys. Rev. E **68**, 015103(R) (2003).

# 高純度ダイヤモンド結晶における 励起子拡散機構の解明と歪みトラップの実現

光物性研究室 森本光

**Abstract** We observe exceptionally high diffusion of excitons in diamond using time-resolved photoluminescence imaging and elucidate the momentum relaxation mechanisms determining the transport properties based on the temperature dependence. We also demonstrate confinement of excitons into a strain-induced trap at 2 K in order to prevent excitons from diffusive expansion.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

ダイヤモンドは光励起により半導体中に生成される電子正孔多体系の研究に適した材料として近年注目される一方、パワーデバイス材料などとしての応用面でも優れた性質を持つ。しかし、高純度試料の人工作製は難しく、またキャリア生成には深紫外光源が必要であるなどの理由から、真性半導体としての研究は遅れている。そこで、本研究では高純度ダイヤモンド結晶における励起子の拡散を2 Kから300 K という広い温度領域で観測し、その温度依存性から拡散機構の解明を行った。また、電子正孔多体系において長い間議論されている励起子ボーズアインシュタイン凝縮 (BEC) の実現に向け、ダイヤモンド結晶に不均一な圧力を印加し歪みポテンシャルを形成することで励起子の空間閉じ込めを行った。

励起子の空間拡散は、パルスレーザー光によって生成した励起子発光の空間分布を時間分解測定することにより観測した。図 1(a) に 7 K で測定した発光イメージの時間発展を示す。時間が経つとともに励起子が広がっているのが分かる。これらの空間プロファイルを経験的関数として解析することで拡散係数  $D$  を求めた。拡散係数は 100 K 以下では温度の低下とともに急激に増加し、2 K では  $D=9.2 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$  という至大な値に達した [1]。これはフォノン放出の抑制という量子的な効果が低温で顕著になり、散乱時間が長くなったことに起因する。また、拡散係数の温度依存性から、励起子が複数の微細構造を持つことを反映した音響フォノンによるバンド内散乱とバンド間散乱が拡散機構として支配的であることが分かった。さらに、発光強度の時間発展から求めた励起子寿命  $\tau$  と合わせて拡散長  $L=(D\tau)^{1/2}$  を算出すると、10 K 以下では励起子は再結合発光するまでに 100  $\mu\text{m}$  程度もの長い距離を移動することが明らかになった [2]。

低温では拡散係数が大きいために励起子を生成してもすぐに密度が低くなってしまふ。よって、励起子系を BEC が起こるような高密度状態にするには、外場によって拡散を制御し微小領域に閉じ込めることが有効な手段になると考えられる。そこで、ダイヤモンド結晶に不均一な圧力を加えて歪みポテンシャルを形成し、励起子閉じ込めを試みた。図 1(b) に歪みポテンシャルを形成した時の発光イメージを示す。明らかに、励起子が生成スポットから離れた歪みポテンシャルの底に移動し、トラップされているのが分かる。この結果はダイヤモンドにおける励起子 BEC 実現への一歩と期待される。

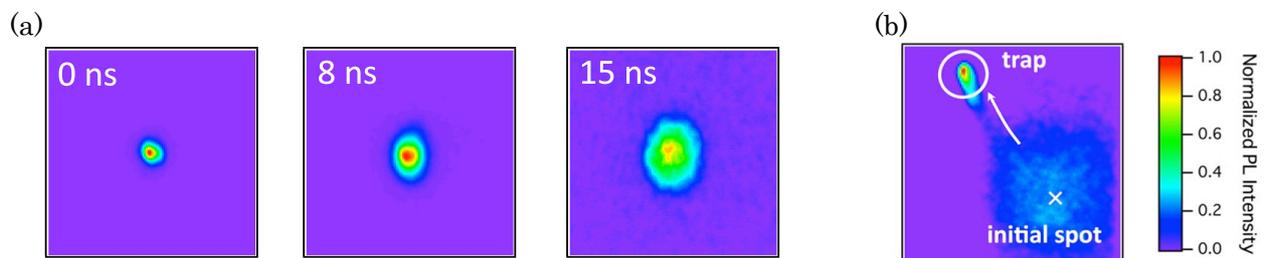


Fig.1 Time-resolved images of exciton photoluminescence in diamond (a) at 7 K without strain potential (delay time: 0, 8, 15 ns), (b) at 2 K with strain potential (delay time: 60 ns). The circle and cross indicate the excitation spot and strain-induced trap, respectively. The area of each image is  $1 \times 1 \text{ mm}^2$ .

## References

- [1] H. Morimoto, Y. Hazama, K. Tanaka, and N. Naka, *Phys. Rev. B* **92**, 201202(R) (2015).
- [2] H. Morimoto, Y. Hazama, K. Tanaka, and N. Naka, *Diamond Relat. Mater.* in press.

# スピン三重項超伝導体 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ で生じる 半整数量子フラクソイド状態 Half-Quantum Fluxoid States in the Spin-Triplet Superconductor $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$

固体量子物性研究室 安井勇氣

**Abstract** Half-quantum fluxoid (HQF) is an unusual fluxoid state in which half-integer multiples of the flux quantum penetrate into a spin-triplet superconductor. By measuring magnetoresistance of micro rings, we observed the proper Little-Parks oscillation for the first time in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ . Furthermore, unexpected large amplitude magnetoresistance oscillations were detected in other rings.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

半整数量子フラクソイド(Half-Quantum Fluxoid, HQF)は超伝導体における特異なフラクソイド状態である。一般的に超伝導体では、秩序パラメータの一価性の条件によりフラクソイドは磁束量子 $\phi_0$ を単位として量子化される(Integer-Quantum Fluxoid, IQF)。一方で、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ のようなスピン三重項 equal-spin pairing 状態が実現している[1]超伝導体では、クーパー対のスピンは $|\uparrow\uparrow\rangle$ と $|\downarrow\downarrow\rangle$ の重ね合わせの状態であるため、軌道の自由度に加えてスピンの自由度も持つ。そのため、2つの自由度が一価性の条件を分け合う形となり、単一の超伝導体でフラクソイドは磁束量子 $\phi_0$ の半整数倍の値を取り得る(HQF)。カンチレバーを用いた  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  微小リングの磁気モーメント測定により HQF の観測が報告されているが[2]、この結果をより確かなものとするためにも、また、デバイス開発を考える上でも別の手法による HQF の検証が必要である。また、HQF にはマヨラナ準粒子が伴うと考えられており[3]、量子メモリー等のデバイスへの応用も可能であることから、電気伝導を用いた HQF の観測は不可欠である。

そこで我々は HQF を輸送特性、特に、磁気抵抗から検出することを目標とした研究を進めている。フラクソイドの量子化による超伝導転移温度  $T_c$  や磁気抵抗 $R(H)$ の振動現象は Little-Parks (LP) 振動として知られており、LP振動を測定することでフラクソイド状態が IQF 状態にあるかHQF 状態にあるかを知ることができる。しかし、HQF 状態ではスピン流が流れるため、IQF 状態に比べてエネルギー的に不安定である。そのため、HQF 状態を実現するためには微小なリングを用い、面内磁場を印加することで HQF 状態を選択的に安定化させる必要がある[4]。まとめると、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  微小リングに面内磁場を印加することで HQF 状態が徐々に安定化し、LP 振動のピークが分裂する形で HQF が観測できると期待される。

我々は、集束イオンビーム法を用いて  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  微小単結晶をリング状に加工し(Fig.)、磁気抵抗測定を行った。リングの電気抵抗の  $c$  軸方向磁場依存性を測定し、 $T_c$  直下で周期的な振動を観測した。この振動周期および振幅は理論予想とよく一致しており、このことから、通常の LP 振動の観測に  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  では初めて成功したといえる。さらに、 $ab$  面内方向へ静磁場を印加した測定により、LP 振動のピーク分裂の観測を目指している。

また、いくつかのリングにおいて理論予想に比べて大きな振幅を持つ磁気抵抗の振動が観測されており、同様の結果はこれまでも報告されている[5]。これらのリングについて臨界電流  $I_c$  の磁場依存性を測定すると超伝導量子干渉計(SQUID)でみられるような  $I_c(H)$ の振動が得られた。この振動の周期についてもリング形状から予想される周期とよく一致しており、リング部に電流の流れを妨げる“障壁”が存在することを示唆している。 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  ではカイラル超伝導状態が実現していると考えられており、カイラルドメインの存在と“障壁”との関連についても議論する。

## References

- [1] Y. Maeno *et al.*, JPSJ **81**, 011009 (2012).
- [2] J. Jang *et al.*, Science **331**, 186 (2011).
- [3] D. A. Ivanov *et al.*, PRL **86**, 268 (2001).
- [4] V. Vakaryuk *et al.*, PRL **103**, 057003 (2009).
- [5] X. Cai *et al.*, PRB **87**, 081104 (2013).

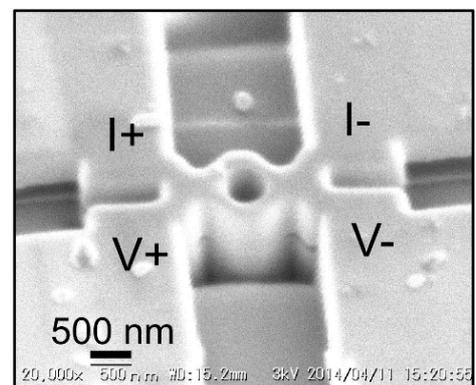


Fig. Scanning electron microscope image of a  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  micro ring.

# 不純物 Disorder 効果による表面局所融解と Slippery 界面

ソフトマター物理学研究室

山下真澄

**Abstract** We proposed and fabricated the “Slippery” interface, at which director of nematic liquid crystals is not anchored at the substrate surfaces and rotates freely by applying a very weak external field. By observing Frederiks transition behavior, it was found that zero-anchoring has been surely accomplished in our devices.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

液晶ディスプレイに用いられているネマチック(N)液晶セルでは、フレデリクス転移と呼ばれるスイッチング原理のために、液晶分子はアンカリング力で基板表面に水平に固定されている。このため、液晶分子を外場により回転させようとする、基板表面の液晶分子はアンカリングエネルギー(W)に比例した微小な角度でのみ回転し、外場を切断すると配向は元の方向に戻る。本研究ではこれとは逆に、界面上での W を自発的に減少させて 0 にし、水平配向ながらも自由に回転できる状態(Slippery 界面)を実現する原理の発明とその実証を目的とする。具体的には、N 相自身が融解した等方(I)相が、ガラス基板との間に薄膜状に挿入された状態を積極的に利用する。そのためには、I 相がガラスと N 相の両界面に完全にぬれた状態となり、かつ N 相が I 相と界面で水平配向となる必要がある。そこで、不純物混合による N-I 相転移温度の降下を応用し、さらに基板に集まりやすい不純物を用いる、これにより、セル中央部に比べ基板付近での不純物濃度を増大させて、表面近傍で局所的に N 相を I 相へ融解させる。特に、不純物を基板表面に誘導させるため、基板には混合する不純物に高い親和性を持つ配向膜を塗布しておく。

本研究では、配向膜としてガラス基板に PMMA (Poly methyl methacrylate,  $M_w=120,000$ )をスピコート、ラビング処理を行いセルを作成した。ネマチック液晶 7CB に不純物として Dodecyl Acrylate を 5wt% 混合したものをセルに注入し水平配向 N 相を得た。Fig.1 に外部磁場を印加した際の配向の変化を、クロスニコルの偏光顕微鏡下で 30°C (a) と 33°C (b) の 2 つの温度において観察した様子を示す。十分に低温では磁場 (0.44T) 印加中 (a2) は、フレデリクス転移によって磁場印加前 (a1) と輝度が変わるが、磁場切断後 (a3) には瞬時に印加前と同じ状態に戻る。このことから、液晶分子は PMMA 基板にアンカリングされていることがわかる。一方、ある一定の温度以上では、基板面近傍のみが液体相となる、ぬれ転移が偏光顕微鏡で確認できた (b)。磁場を印加すると、液晶分子は磁場方向に配向し (b2)、(a) の場合と異なり、磁場切断後も配向がもとの状態には戻らない (b3)。以上の結果から、(b) では I 相のぬれ薄膜がガラス基板上に形成され、Slippery 界面が実現されている。

次に、フレデリクス転移の閾値磁場強度の各温度でのセル厚依存性測定し、 $W \propto 1/de$  の関係を持つ外挿長  $de$  を見積もった。水平軸にセル厚  $d$ 、垂直軸にしきい値磁場の逆数  $1/B_c$  として図に表すと、横軸との切片が  $-2de$  に対応する (Fig2)。アンカリング状態 (30.4°C ~ 32.1°C) では  $de$  は有限の値を保ち、温度上昇と共に長くなってアンカリングは弱まることわかった。一方、32.5°C 以上ではぬれ転移を起こして、Slippery 界面が形成され、 $de$  が発散的に長くなり、アンカリングエネルギー  $W \approx 0$ 、すなわち基板面内でのアンカリング力が失われていることが示された。

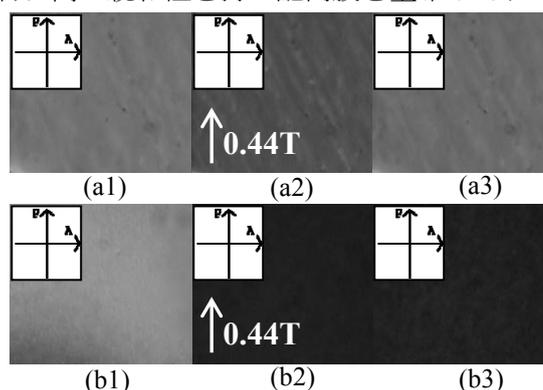


Fig.1 Polarizing microphotographs of the nematic texture with anchored (a) and free (b) surfaces before (a1, b1), during (a2, b2) and after (a3, b3) the applied magnetic field.

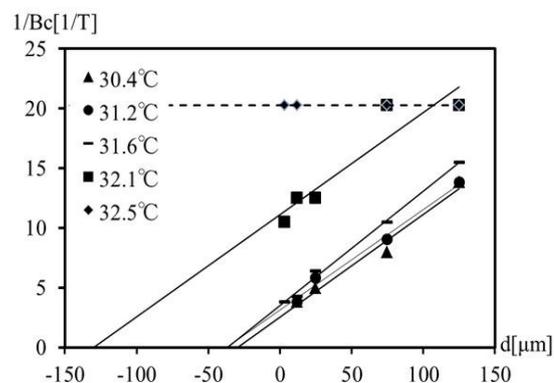


Fig.2 Cell gap dependence of the critical magnetic field strength of the Frederiks transition in the PMMA-coated nematic cells at various temperatures.

# ハロゲン化鉛ペロブスカイト半導体 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ ( $\text{X}=\text{I}, \text{Br}$ ) 単結晶の光キャリアダイナミクス

ナノ構造光物性研究室 山田琢允

**Abstract** Photocarrier dynamics in lead-halide perovskite semiconductor  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$  ( $\text{X}=\text{I}, \text{Br}$ ) single crystals were studied using time-resolved photoluminescence (PL) measurements. By comparing the results of time-resolved PL measurements under one- and two-photon excitation conditions, we found that the PL dynamics are dominated by photocarrier diffusion and photon re-absorption processes.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

有機無機ハイブリッドペロブスカイト半導体は、塗布プロセスによる作製にもかかわらず高い開放電圧を示し、優れた新しいタイプの太陽電池材料として近年世界的に注目を集めている。2009年に初めて太陽電池に応用されて以降、その変換効率は既に20%を超えており、実用化に向けて様々な研究が行われている[1, 2]。ペロブスカイト半導体太陽電池が高い変換効率を示す理由として、大きな吸収係数に加えて、励起子ではなく自由キャリアの存在とその大きなキャリア拡散長があげられている[3-5]。これまでの研究の多くはグレイン構造を持つ多結晶薄膜試料を用いて行われており、その光学特性はグレインのサイズや表面欠陥などによって支配される可能性がある。ペロブスカイト半導体の基礎光学特性については未だ不明瞭な点も多く、それらを解明するにはグレイン構造のない単結晶試料を用いて研究を行う必要がある。そこで本研究では、ハロゲン化鉛ペロブスカイト半導体単結晶を対象に時間分解発光分光測定を行い、光電変換過程に関わる光キャリアダイナミクスの研究を行った。

図1に  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  単結晶の時間分解発光スペクトルを示す。試料表面近傍を励起する1光子励起を用いた場合、励起直後にバンド端発光が観測され、発光スペクトルは時間経過と共にレッドシフトした。一方、試料内部を励起する2光子励起の場合は、発光スペクトルはバンド端から大きくレッドシフトしており、ピークエネルギーは時間経過に対してはほとんど変化しなかった。さらに、1光子励起および2光子励起での発光の時間減衰は非指数関数的であった。1光子励起および2光子励起の励起キャリア分布の違いを考慮し、それぞれの結果を比較することで、1光子励起における発光のレッドシフトは、光キャリアの試料内部への拡散と発光の再吸収で説明できることが分かった[6]。この結果は  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  が長いキャリア拡散長を持つことを意味する。さらに、タンデム型太陽電池材料として期待されているワイドギャップペロブスカイト半導体である  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  単結晶でも同様の結果が得られた[7]。これらの測定結果から、室温におけるハロゲン化鉛ペロブスカイト半導体のキャリアダイナミクスを議論した。

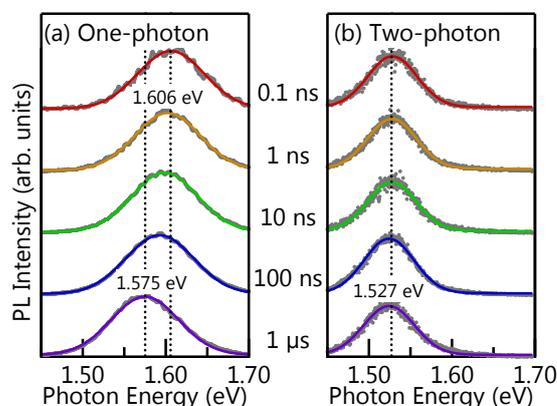


Fig. 1. Time-resolved PL spectra of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  single crystals for (a) one-photon excitation and (b) two-photon excitation. [From Ref. 6]

## References

- [1] A. Kojima *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **131**, 6050 (2009).
- [2] W. S. Yang *et al.*, *Science* **348**, 1234 (2015).
- [3] Y. Yamada *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **136**, 11610 (2014).
- [4] S. D. Stranks *et al.*, *Science* **342**, 341 (2013).
- [5] G. Xing *et al.*, *Science* **342**, 344 (2013).
- [6] Y. Yamada, T. Yamada *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **137**, 10456 (2015).
- [7] T. Yamada *et al.*, *Adv. Electron. Mater.* (2016) in press.

# リカレントニューラルネットワークの微視的不安定性

非線形性動力学研究室 山中 譲

**Abstract** We analyze the microscopic stability of a network of neurons. We reveal that the network exhibits a variety of dynamical states for microscopic instability. The presence of a variety of dynamical states in such a simple network implies more abundant microscopic fluctuations in real neural networks.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

動物が一定の刺激に対して同一の行動を繰り返している時、脳の個々の神経細胞は必ずしも同一の挙動をとっていない。動物の一定の行動と個々の神経細胞の不規則な活動の対比は、熱力学的な気体に類似するものがある。それは、気体分子集団の巨視的な状態が少数の自由度をもつ熱力学的な法則に従うのに対して、個々の気体分子の状態は大自由度をもちカオス的な振る舞いをするのである。微視的なダイナミクスと巨視的なダイナミクスとを関連付けることは、多様な現象に対して統計物理学における大きな目標となっており、能動素子の集まり[1]や人間の集団[2]についても研究されてきた。

ここでは、神経細胞の活動を2値と単純化した McCulloch-Pitts モデル、

$$s_i(t+1) = \text{sgn} \left( \sum_{j=1}^N w_{ij} s_j(t) + h_i \right), \quad (1)$$

を扱う。 $s_i(t)$ は時刻 $t$ での $i$ 番目の神経素子の状態を表し、 $w_{ij}$ は素子同士の結合の重みであり、 $h_i$ は素子への入力を表す。ランダムに結合したネットワークでは、神経活動の集団平均が決定論的に従い、単安定、双安定と、周期振動の3つの巨視的なダイナミクスが存在する[3]。この系では、個々の神経素子の状態の集まりで定義する微視的な状態が微視的な摂動に対して不安定であることが指摘された[4]。しかし、これは小規模な系の数値計算で確認されたものであり、これまで、微視的な不安定性のメカニズムについては明らかにされていなかった。また、別の研究では系の微視的不安定性が解析的に調べられているが、特定のパラメータに限られていた[5]。

本研究では、解析的な方法と数値計算手法を用いて、神経ネットワークの微視的不安定性を調べた。単一の素子の状態を変化させた時に次の時刻で素子の状態が変化する確率及び、2つの状態間の距離の写像を議論することによって、微視的不安定性をもつ条件は、

$$|\bar{w}m + h| < \sqrt{\log(4N/\pi^2)}, \quad (2)$$

となることを示した (Fig. 1) [6]。なお、 $m$ はネットワーク全体の活動度を表す巨視的な量である、

$$m = \sum_{i=1}^N s_i. \quad (3)$$

条件(2)は結合と入力の強さだけでなく、系全体の活動度にも依存していることから、単純なモデルであるにも関わらず、微視的不安定性には多様な状態があることが分かった。よって、より複雑な信号伝達を行う実際の神経系では、さらに多様性がある可能性を示唆する。

## References

- [1] J. Ito and K. Kaneko, Phys. Rev. Lett. **88**, 028701 (2001)
- [2] A. L. Barabasi, Nature **435**, 207-211 (2005).
- [3] S. Amari, Proc. IEEE **59**, 35-47 (1971)
- [4] S. Shinomoto, Prog. Theor. Phys. **75**, 1313-1318 (1986).
- [5] S. Amari, Kybernetik **14**, 201-215 (1974)
- [6] Y. Yamanaka, S. Amari and S. Shinomoto, Phys. Rev. E **91**, 032921 (2015)

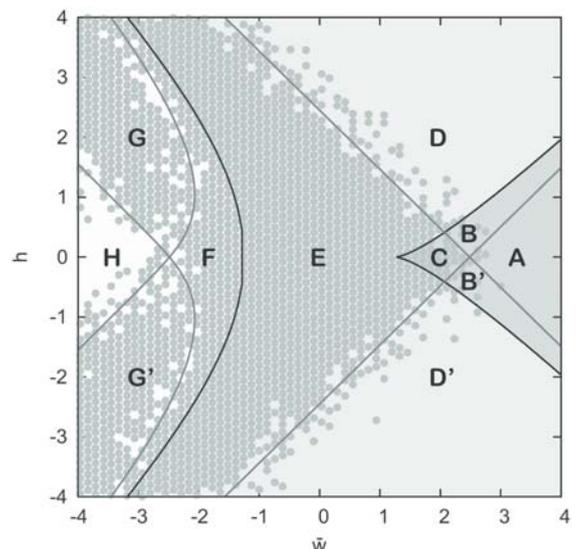


Fig. 1. Microscopic instability obtained by numerical simulation of the networks of  $N = 1000$  (gray line). A set of parameters with which the network exhibit instability is depicted as a dot.

# トポロジカル絶縁体における交流スピホール伝導度への電子相関効果の研究

凝縮系理論研究室 遠藤伸明起

**Abstract** We study the ac spin Hall conductivity and effects of electron correlation in topological insulators by using the Kane-Mele-Hubbard model. Analyzing correlation effects numerically, we find the structure of Hall conductivity shifts to lower energy regime with increasing electron correlation and characteristic structure owing to spin-orbit coupling and Coulomb interactions.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

近年、トポロジカル絶縁体が物質の新しい量子相として注目を集め、新規な性質が数多く報告されている。トポロジカル絶縁体はバルクが絶縁体であるが、(非磁性)摂動に対して robust なギャップレスエッジ状態を持つ物質であり、ギャップレスエッジ状態の存在はトポロジカル数によって特徴づけられる。従来、トポロジカル絶縁体は自由電子系で扱われることが多かったが、最近では、トポロジカル物質での電子間相互作用の効果が興味をもたれており、電子相関が強いことが期待される d-, f-電子系でのトポロジカル相の実現が話題になっている [1]。

一方で、トポロジカル相の一つである量子ホール相で、量子ホール効果の光学測定が理論的に提案され [2]、実際にテラヘルツ光を用いて GaAs/AlGaAs ヘテロ構造 [3] やグラフェン [4] で観測された。量子ホール効果は通常は電極を取り付け電流で測定される。光学的に測定される場合、光に対する交流応答として、磁気ファラデー効果、カー効果から交流伝導度が求められる。トポロジカル絶縁体の動的応答を調べる上で、これらの物理量は興味深いものとなっている。しかしながら、トポロジカル絶縁体の交流伝導度に対する電子相関効果の研究は、これまでほとんど行われていない。

これら 2 つの背景から、本研究では電子相関のある  $Z_2$  トポロジカル絶縁体として、Kane-Mele-Hubbard 模型 [5] の交流スピホール伝導度を調べた。Kane-Mele-Hubbard 模型のハミルトニアンは以下で与えられる。

$$H = t \sum_{\langle i,j \rangle; \alpha, \beta} c_{i\alpha}^\dagger c_{j\beta} + i\lambda_{so} \sum_{\langle\langle i,j \rangle\rangle; \alpha, \beta} \nu_{ij} c_{i\alpha}^\dagger \sigma_z c_{j\beta} + U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$$

ここで第一項は最近接格子間のホッピング、第二項は次近接格子間のホッピングによるスピン軌道相互作用、第三項はオンサイト型の電子間クーロン相互作用を表す。電子相関の効果は、動的平均場理論に反復摂動法を援用することにより数値的に求めた。

結果としてスピホール伝導度が、直流の量子化された値から交流領域に連続的に有限の値を持つこと、電子相関が強くなるとともに、スピホール伝導度全体の構造が低エネルギー側にシフトしていることが分かった。また、電子間相互作用をさらに強くしていくと、スピホール伝導度の交流領域の高エネルギー側に、スピン軌道相互作用とクーロン相互作用に起因する特徴的なピーク構造が現れることを見いだした。

## References

- [1] A. Shitade et al., Phys. Rev. Lett. 102, 256403 (2009).
- [2] T. Morimoto et al., Phys. Rev. Lett. 103, 116803 (2009).
- [3] Y. Ikebe et al., Phys. Rev. Lett. 104, 256802 (2010).
- [4] R. Shimano et al., Nat. Commun. 4, 1841 (2013).
- [5] S. Rachel et al., Phys. Rev. B 82, 075106 (2010).

# 後流を介した群れの編隊維持と抵抗軽減

流体物理学研究室 天目直宏

**Abstract** Focusing on wakes induced by obstacles and their interactions through the wakes, formation flight and drag reductions are studied numerically. We model birds or fish as two-dimensional square cylinders and examine their collective motions by solving directly the flow in which the cylinders are self-propelled.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

鳥や魚でみられるように、飛翔・遊泳する複数の生物個体が群れをつくると、各個体が空気や水から受ける抵抗は変化する。群れの中で個体同士は、流体、特に個体の作る後流を介して力を及ぼし合い相互作用を行う。

この結果として、生物個体は、群れの中で適切な空間的配置をとり、編隊を形成することで、飛翔・遊泳に掛かるコストを群れ全体で節約することができる [1]。例えば、直線状に並んだ群れに対し、その法線方向から一様流が流れる場合、その個体間の間隔が小さくなるほど、各個体が受ける(流れ方向の)抵抗は大きくなる [2]。また、V字型の編隊をとる群れが飛翔する時では、V字の中心角を変えると、流れ方向成分の抵抗だけでなく、流れに垂直な方向の抵抗が変化する [3]。

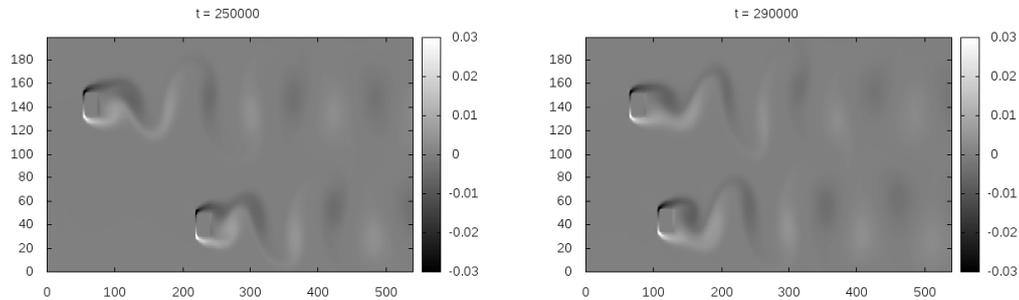


Fig.1 運動する一対の角柱が作る渦度場のスナップショット。上下の角柱から出る渦列の位相差が二時刻で反転している。

本研究では、この後流を介した相互作用に着目し、編隊の安定性や個体の受ける抵抗軽減に対する流体運動の役割を数値的に調べる。流体運動の数値計算手法として多粒子分散系のシミュレーション法として有効である格子ボルツマン法を用いる [4]。まず、各個体を角柱で置き換えた上で、レイノルズ数  $Re = 100$  程度の2次元非圧縮粘性流のもと、次の数値計算手法の妥当性を検証する。1) 格子からずれた壁境界での粒子分布関数の与え方 [5]、2) 運動量交換による応力計算 [6]、3) 流出境界条件 [7]。

次に、角柱のダイナミクスを導入し、流体を介した集団運動を調べる。角柱の推進力としてニュートン則を仮定し、適切な質量を想定し慣性力を与えている。Fig.1 に計算例として、初期条件で流れに垂直に一列に置いた2個の角柱の運動のスナップショットを示した。角柱は後流を介して相互作用を行い、秩序的な運動を行うことがわかった。さらに、角柱の数を増やして集団運動の特性及び抵抗軽減などの利得についても検討する。

## References

- [1] Badgerow, J. P. and Hainsworth, F. R., *Journal of Theoretical Biology*, **93**, 4152 (1981).
- [2] Kumar, S. R., Sharma, A. and Agrawal, A., *Journal of Fluid Mechanics*, **603**, 369397 (2008).
- [3] Sewatkar, C.M., Sharma, A. and Agrawal, A., *Artificial Life*, **16**, 245–258 (2010).
- [4] 稲室隆二, *物性研究*, **77**, 197–232 (2001).
- [5] Filippova, O. and Hanel, D., *J. Comp. Phys.*, **147**, 219 - 228 (1998)
- [6] Mei, R., Yu, D. and Shyy, W, *Physical Review E*, **Vol.65**, 041203 (2002)
- [7] 蔦原 道久, 平石 雅之, *計算数理工学論文集 Vol.6*, No.1(2006)

# 二色型光格子中の Bose 凝縮体における 非線形効果について

物性基礎論凝縮系研究室 原 良甫

**Abstract** We study the dynamics of atomic Bose condensate in bichromatic lattices. On numerical calculations, a swallow-tail energy loop appears with large interaction. In this case, we find a parameter region where the sound velocity calculated from the static Gross-Pitaevskii equation disagree with that from the excitation spectrum.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

光格子中の冷却気体において Bose-Einstein 凝縮が実現されてから様々な研究が行われてきた。Bose 凝縮体における二体相互作用は波動方程式の中で非線形項として現れる。基本的な量子過程の一つである Landau-Zener 遷移については、相互作用の弱い系において実験的に観測されている [1]。一方で非線形性が強い場合には、二準位モデルにおいて断熱変化によっても上のエネルギー準位への有限の遷移確率が残ることが示されていた [2]。これは相互作用が臨界値を超えたときに、Fig. 1 で見られるような swallow tail と呼ばれる燕の尾の形をしたエネルギー構造が形成されるようになることが要因にある。また一次元光格子中の超流動流に関する実験で、Landau 不安定や動的不安定による超流動流の崩壊が見られた [3]。

本研究ではこれらの非線形効果を、二色型光格子中の Bose 凝縮体のダイナミクスを記述する離散型 Gross-Pitaevskii 方程式 (1) において見ていく。

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Phi_j = -J(\Phi_{j-1} + \Phi_{j+1}) + V_j \Phi_j + nU |\Phi_j|^2 \Phi_j, \quad V_j = (-1)^j V \quad (1)$$

ここで、 $\Phi$  は波動関数、 $J$ 、 $V$ 、 $nU$  はそれぞれホッピング、長周期光格子ポテンシャル、二体相互作用を表す。まず、式 (1) の定常解を数値的に求めることでエネルギー構造を計算し、Fig. 1 で示すような swallow tail が生じることを見る。また式 (1) の実時間発展を数値的に計算することで、非線形 Landau-Zener 遷移により、遷移確率が相互作用の強さによって質的な変化が起きることが見られる。さらに平均場からのゆらぎを求める Bogoliubov 方程式を数値的に解くことで動的不安定になる領域を調べた結果、凝縮体の運動量が  $\pi$  に等しくなる点で動的安定になる様子が見られた。Fig. 2 で示すように、GP 方程式から熱力学的に計算した音速と Bogoliubov 方程式の励起スペクトルから計算した音速を比較することで、運動量が  $\pi$  の点においてこれらの量が一致しないことを見出した。

## References

- [1] J. B. Reeves *et al.*, *New Journal of Physics*, **16**, 065011 (2014).
- [2] Biao Wu and Qian Niu, *Phys. Rev. A*, **61**, 023402 (2000).
- [3] L. De Sarlo *et al.*, *Phys. Rev. A*, **72**, 013603 (2005).

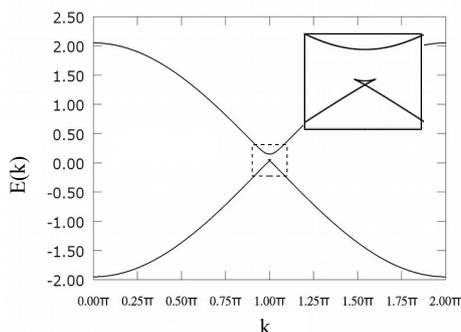


Fig. 1. swallow tail ( $V=0.05$ ,  $nU=0.20$ )

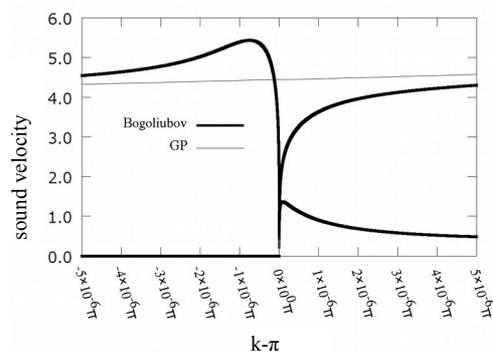


Fig. 2. sound velocity ( $V=0.05$ ,  $nU=0.102$ )

# Study of superfluid $^3\text{He}$ phases in stretched aerogel

Condensed Matter Theory Group

Siwei Yang

**Abstract** We investigate possible phases of superfluid  $^3\text{He}$  infused into uniaxially stretched aerogel based on a Ginzburg-Landau (GL) free energy derived microscopically by assuming the strong coupling effect to be isotropic. We found that “the biaxial ESP state”, which has been proposed by Sauls [1], is unstable compared with the conventional phases, suggesting that the prediction in [1] is not justified without an anisotropy in the strong coupling effect.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

Since superfluid  $^3\text{He}$  was discovered, a large amount of studies have clarified that the phase diagram of the homogeneous isotropic superfluid  $^3\text{He}$  is composed only of the Anderson-Brinkman-Morel (ABM) state and the Balian-Werthamer (BW) states. On the other hand, there is a possibility of new states in superfluid  $^3\text{He}$  if an anisotropy can be introduced in some manner.

Emergence of “the polar state” in superfluid  $^3\text{He}$  infused into uniaxially stretched aerogel has been predicted theoretically [2] and verified quite recently in Ref.[3]. The polar state has no active orbital degrees of freedom in the order parameter and thus, stabilizes the “Half Quantum Vortex” (HQV), which contains the unpaired Majorana quasiparticle in its core [4]. In fact, the recent NMR experiment made by Aalto University [4] has shown data consistent with the existence of the HQV lattice in rotating  $^3\text{He}$  in aerogel used in Ref.[3].

On the other hand, J.A.Sauls phenomenologically proposed a new state in an axially anisotropic aerogel -- “the biaxial ESP state”, based on explanation of the NMR data of North-Western University [5]. He pointed out that the biaxial ESP state is represented by a chiral axis which can lie on a cone with some angles relative to the strain axis. But there is no evidence that the biaxial ESP state is more stable than the BW state. Even in the thin films which has a stronger uniaxial anisotropy, the competition between the ABM state and the BW state is considered under high pressure. Thus, it's unclear why the BW state is absent in Saul's prediction.

In this work, we examined the stability of each states in superfluid  $^3\text{He}$  infused into axially stretched aerogel by extending the theory in [2] and assuming possible anisotropic terms in the strong coupling correction to be negligibly small. We found that the biaxial ESP state cannot replace the BW state at all, suggesting that an unknown anisotropy effect on the strong coupling correction might be necessary to obtain a phase diagram consistent with the argument in Ref.[1].

[1] J. A. Sauls, Phys. Rev. B 88, 214503 (2013).

[2] K. Aoyama and R. Ikeda, Phys. Rev. B 73, 060504(R) (2006).

[3] V. V. Dmitriev et al., Phys. Rev. Lett. 115, 165304 (2015).

[4] D. A. Ivanov, Phys. Rev. Lett. 86, 268 (2001).

[5] J. Pollanen et al., Nature Physics 8, 317 (2012).

# 超低温イッテルビウムーリチウム原子間の衝突特性の測定

量子光学研究室 植田信也

**Abstract** We succeeded in detecting an inelastic loss between the metastable state of Ytterbium (Yb) and the ground state of Lithium (Li) by loading the quantum degenerate mixtures into an optical lattice. We search for Feshbach resonances between Yb and Li toward quantum simulation of impurity system.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

光格子中の冷却原子は高い制御性を持ち、Hubbard model で記述される量子多体系を理解する上で非常に有用である。その中でも我々は不純物系に着目した。不純物系ではアンダーソン局在や近藤効果などの不純物系特有の興味深い物理現象が存在する。これらを解明するために、系の様々なパラメーターを精度よく制御しながら実験を遂行すること (=量子シミュレーション) を研究目標としている。

この不純物系を構成するために我々は、約 29 倍もの質量比があるイッテルビウム (Yb) とリチウム ( ${}^6\text{Li}$ ) の 2 種類の原子を用いた。この大きな質量比のため、光格子に原子を導入した際に Yb は格子中に閉じ込められる一方で、Li は格子間を比較的自由に動くことができる。このようにして、Yb を光格子中で局在する不純物、Li を遍歴するフェルミオンとするモデルが再現できる。また、不純物系の量子シミュレーションを行うためには Yb と Li 間の相互作用を自在に操作することが必要不可欠である。超低温原子間の相互作用は s 波散乱長で特徴づけられ、この s 波散乱長を制御する手法として外部磁場やレーザーを利用した Feshbach 共鳴[1]が一般に知られている。Yb の基底状態  ${}^1\text{S}_0$  と Li の基底状態  ${}^2\text{S}_{1/2}$  では磁場 Feshbach 共鳴は理論的に導出されているものの[2]、幅が数  $\mu\text{G}$  と非常に狭く実験で用いるのは現実的ではない。しかし、Yb の準安定状態 ( ${}^3\text{P}_2$ ) と Li の基底状態 ( ${}^2\text{S}_{1/2}$ ) では異方性 Feshbach 共鳴が存在し得る[3, 4]。

不純物系の量子シミュレーションに向けて、まず我々は波長 532nm のレーザーを用いて光格子を生成し、そこに  ${}^{174}\text{Yb}$  と  ${}^6\text{Li}$  の 2 種類の原子の同時量子縮退を導入した。特に  ${}^{174}\text{Yb}$  と  ${}^6\text{Li}$  の 29 倍もの大きな質量比に起因する重力の違いによる空間的なずれを補正するために、新たに空間的な強度勾配を持ったレーザーを照射することで改善を行った。さらに、超低温の  ${}^{174}\text{Yb}({}^3\text{P}_2)$  状態を生成するために、Yb 原子の  ${}^1\text{S}_0$ - ${}^3\text{P}_2$  遷移に共鳴する 507nm の狭線幅光源を新たに準備した。これらにより、超低温の  ${}^{174}\text{Yb}({}^3\text{P}_2)$  と  ${}^6\text{Li}({}^2\text{S}_{1/2})$  の間の衝突特性を調べることが可能になり、実際に  ${}^6\text{Li}({}^2\text{S}_{1/2})$  の存在下で  ${}^{174}\text{Yb}({}^3\text{P}_2)$  のトラップロスを測定したところ、Fig. 1 に示すように、 ${}^{174}\text{Yb}$  と  ${}^6\text{Li}$  間で非弾性衝突が起きていることが観測された。また、 ${}^{174}\text{Yb}({}^1\text{S}_0)$  と  ${}^{174}\text{Yb}({}^3\text{P}_2)$  間の非弾性衝突レートおよび 2 体以上の  ${}^{174}\text{Yb}({}^1\text{S}_0)$  の非弾性衝突レートに  ${}^6\text{Li}$  がどう影響するか実験を行った。光格子ポテンシャルを深くしモット絶縁体状態にすることで正確に  $N(N=1, 2, 3, \dots)$  個の粒子を 1 サイトに局在させることができるため、これによって極めて理想的な条件で衝突特性を調べることが可能になった。

相互作用の制御については 4G 以下の低磁場において光格子中で分光実験を行うことで  ${}^{174}\text{Yb}({}^3\text{P}_2)$  と  ${}^6\text{Li}({}^2\text{S}_{1/2})$  の Feshbach 共鳴を探索したが、現在のところ、Feshbach 共鳴らしきものは観測されなかった。今後、より高磁場で Feshbach 共鳴を探す予定である。

## References

- [1] C. Chin *et al.*, Rev. Mod. Phys. **82**, 1225 (2010).
- [2] D.A. Brue *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 043201 (2012).
- [3] T. Chen *et al.*, New J. Phys. **17**, 103036 (2015).
- [4] W. Dowd *et al.*, New J. Phys. **17**, 055007 (2015).

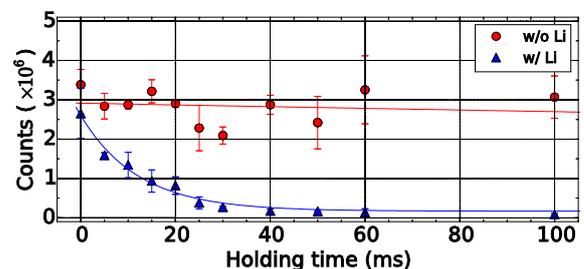


Fig. 1. Trap loss of  ${}^{174}\text{Yb}({}^3\text{P}_2, m_j = -2)$  in an optical lattice at 500 mG. The blue triangles represent the data in the presence of  ${}^6\text{Li}({}^2\text{S}_{1/2})$ . The red circles represent the data without  ${}^6\text{Li}({}^2\text{S}_{1/2})$ .

# 重水素化蛋白質の作成とその評価方法に関する研究

生体分子構造研究室 上村拓也

**Abstract** Deuterated proteins are needed for analyzing hydrogen atoms in a protein molecule with neutron diffraction method. Some deuteration ways and interesting characteristics of proteins have been researched, and we have proposed some schemes to assume deuterate rate of proteins and its efficiencies.  
© 2016 Department of Physics, Kyoto University

動植物・微生物を問わず生命活動には蛋白質の働きが不可欠であり、その生理的、化学的な機能の理解には、正確な三次元構造を原子レベルで知る必要がある。一般に生理機能発現における化学反応過程においては、原子集団あるいは蛋白質分子内部の電子状態、水素原子位置などが大きな役割を持つ。従ってこれらの構造上の情報が機能解析には不可欠である。

水素原子までを含めた構造解析の手法としては NMR、X 線回折、中性子線回折などが存在する。NMR は分子量の大きな蛋白質の構造解析に適さず、また X 線での水素原子位置決定には超高分解能測定を必要とするため困難を極める。中性子では重水素と軽水素の散乱長が正負逆であり、かつ重水素は炭素原子ほどの散乱長を有することから、中性子は分子内に多数存在する水素原子の座標位置を正確に決定できる唯一の手段である。本研究では、蛋白質の中性子解析に向けた種々の重水素化手法の検討及び、重水素化試料の評価方法について考察を行った。

重水素化には大きく分けて 3 つの方法が存在する。簡便な方法として用いられる、蛋白質試料の重水溶液への浸透による部分重水素化はコストの低い方法であるが、蛋白質分子内部の水素原子を置換できないという欠点がある。しかしながら、分子内の流動性水分子が機能に関連する場合にはこの方法も有効である。カタラーゼによる酵素反応では溶媒の水分子及び基質の過酸化水素の水素原子が最も重要であることから、この方法を適用した重水素化結晶を作成して放射光回折実験を行った。次の部分重水素化の方法として、分子内部を溶媒に露出させることによって解離性水素に限れば重水素化できる巻き戻し重水素化がある。この試料の放射光構造解析を行い、重水素化評価方法を検討した。本研究では結晶回折実験が比較的容易に行えるリゾチームを対象とした。完全重水素化は非常にコストがかかる方法ではあるものの、蛋白質に含まれる全ての水素原子を置換することができ、酵素反応に際して蛋白質内部における側鎖の水素原子が重要となる場合などに必須となる方法である。これらはサリチル酸水酸化酵素と有機水銀分解酵素に対して研究を進めた。両者とも重水培地における完全重水素化のための大腸菌発現系を構築し、特に前者については水素原子を除く立体構造を決定して反応機構を考察した。

中性子線回折を行う際に、予め蛋白質の重水素化数や蛋白質内部の重水素化されている位置を把握しておくことは重要である。その方法を検討するため、重水素と軽水素の質量の違いに着目し、結晶状態の蛋白質について、重水素化の有無による比重の違いや熱ゆらぎの大きさについて考察した。比重測定については有機溶媒を用いた浮沈法を用いて、軽水素下での結晶と重水置換結晶の双方について結晶の比重の差及び蛋白質の分子量を解析した。また、熱ゆらぎの考察には X 線結晶回折データにおいて熱ゆらぎの大きさを表現する温度因子 (*B*-factor) を用いた。一般に蛋白質の温度因子は重水素化により低下すると考えられているが [1]、デバイが提唱したモデル [2] を用いることで蛋白質分子全体の温度因子を評価したところ、計算値においても重水素化によって温度因子が低下するという結果を得た。その後一原子単位での重水素化の有無を調べるため、各水素原子について温度因子による重水素化評価方法を考察した。

今後、重水素化試料のさらなる検討には中性子線回折を用いた研究が必要となる。また試料評価方法の発展においては、計算機や精密なモデルを用いた解析が不可欠である。

## References

- [1] J.B. Artero et al., *Acta Cryst. D* **61**, 1541-1549 (2005).
- [2] P. Debye, *Annalen der Physik* **348**, 49-92 (1913).

# 境界の幾何形状に誘起されるバクテリアの集団運動

時空間秩序・生命物理研究室 衛藤貫太

**Abstract** Rod-shaped bacteria those swim with flagella show collective behaviors including rotation and turbulence when they are densely encapsulated in a water-in-oil droplet. In this work, we experimentally study the collective motion of elongated *E. coli* bacteria in flower-shaped microchambers. The analysis of velocity fields indicates periodic vortex formation occurs as geometry-induced effect.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

枯草菌 (*Bacillus subtilis*) の懸濁液を微小な油中水滴のドロップレット内に封入すると、菌とドロップレット境界、および菌どうしの衝突で生じるネマチック相互作用により局所的な配向秩序が生じ、境界に沿った回転や多数の渦からなる乱流のような集団運動パターンが形成される [1,2].

本研究では、そうしたバクテリアの集団のネマチック相互作用による秩序形成に着目し、大腸菌 (*E. coli*) の直進性変異体 RP4979 を cephalexin[3]で薬剤処理することで、従来の枯草菌と同様の運動を取り出せるうえに、バクテリアの菌長を新たなパラメータとして制御し、ネマチック相互作用を変化させることができる実験系を構築した。次に、撥水処理を施した PDMS 樹脂製チャンバーの微小空間内にバクテリアの懸濁液を封入することで、任意形状の境界のもとで観察を行った。ここで、壁の境界形状として花型チャンバーを作製して観察を行い、秩序変数が周期的な変化を見せるものを発見した。以下にその典型的な例を示す。

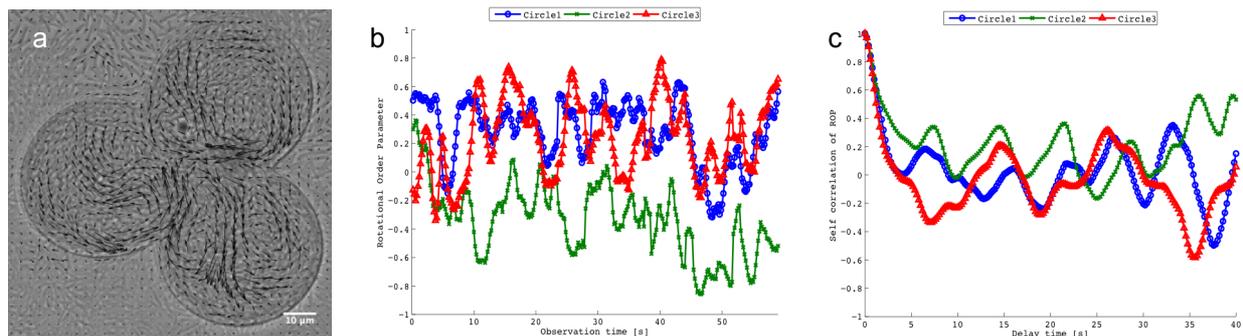


Fig. 1. Collective motion of *E. coli* confined in a flower-shaped microchamber. (a) PIV flow field for vortices created by *E. coli* cells those swim in the flower-shaped microchamber. (b-c) Rotational Order Parameter (ROP) for each circle constituting the flower-shape. (b) Time evolutions of the ROPs. (c) Auto-correlations of the ROPs.

図 1a は複数の半径25μmの円形（花卉）から構成される花型のチャンバーに封入された、菌長を制御された*E. coli* (~5μm) の運動の様子である。バクテリアの流れの場の解析には、PIV (Particle Image Velocimetry) を用いた。秩序変数として ROP (Rotational Order Parameter) :

$$\text{ROP} = \frac{\sum_i \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{t}_i}{\sum_i |\mathbf{v}_i|} \quad (1)$$

を花卉部分の3つの円形内で計算した。ここで、 $\mathbf{v}_i$  はPIV結果のベクトル、 $\mathbf{t}_i$  はPIV格子上での、動径方向の単位ベクトルである。ROP は円形領域内の、PIV で得られたベクトル場から求められ、完全に一樣な回転運動ならば +1 または -1 の値を取り、完全にランダムな運動 (乱流状態) では 0 の値を取る。ROP の時間変化グラフ (図 1b) を見ると、一樣回転に近い状態 (ROP ~ ±1) と乱流にも見える状態 (ROP ~ 0) を振動しており、ROP の自己相関関数 (図 1c) からは、周期的な相関が見られた。本発表では新たに開発した手法と実験結果の詳細を発表し、境界形状に誘起される集団運動について議論する。

## References

- [1] H. Wioland, F. G. Woodhouse, J. Dunkel, J. O. Kessler, and R. E. Goldstein, Phys. Rev. Lett. 110, 268102 (2013)
- [2] E. Lushi, H. Wioland, and R. E. Goldstein, PNAS vol. 111 no. 27 9733-9738 (2014)
- [3] S. Takeuchi, W. R. Diluzio, D. B. Weibel, and G. M. Whitesides, Nano Lett. 2005 Vol. 5, No. 9 1819-1823

# 平行平板中の超流動 $^3\text{He-A}$ 相における Surface Chiral Domain Wall により安定化されたテクスチャー

低温物理学研究室 岡本 耀平

**Abstract** We succeed in observing topological defects in a slab of superfluid  $^3\text{He-A}$ , which has much smaller  $1-R_T^2$  than ever found. Numerical simulation suggests the existence of “Dipole-Locked Soliton” associated with the chiral domain walls at the surface. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

超流動  $^3\text{He-A}$  相では、スピン  $\mathbf{S}$  と直交するベクトル  $\mathbf{d}$  や、Cooper 対の軌道角運動量の方向を示すベクトル  $\mathbf{l}$  で指定される内部自由度が存在する。これらのベクトルがどの方向を向くかは、磁気エネルギー、磁気双極子エネルギー、勾配エネルギーといった拮抗する各種自由エネルギーの和が最小となるように決定される。また、壁がある場合には、凝縮エネルギーの効果によって壁からコヒーレンス長と程度の領域で  $\mathbf{l}$  は壁と垂直になる。こうした内部自由度の成す織目構造（テクスチャー）を推定する際に用いられるのが、NMR の周波数シフトである。これは横共鳴周波数  $\omega$  が、内部自由度の状態に応じて次式のように Larmor 周波数  $\omega_L$  からずれるという性質を有しているためである。

$$\omega^2 = \omega_L^2 + R_T^2 \Omega_A^2(T) \quad (1)$$

ここで、 $\Omega_A(T)$  は A 相における縦共鳴周波数である。全空間で一様に dipole-lock( $\mathbf{d} // \mathbf{l}$ ) した基底状態においては  $R_T^2=1$  であるが、トポロジカルに保護された「位相欠陥」—例えば量子渦やドメインウォール—が存在するなどの理由でテクスチャーが非一様な場合には、その付近で  $R_T^2 < 1$  のモードのスピนว波が立ち、スペクトルにサテライトピークが観測される。過去に行われた実験では、サテライトピーク的位置から  $R_T^2$  を求め、その値からテクスチャーの構造を推定している[1]。しかしながら、この方法でテクスチャーの実空間分布を把握することは不可能である。

そこで我々は、MRSI(Magnetic Resonance Spectroscopic Imaging)という、位置ごとの周波数分布を信号強度分布と同時に測定可能な技術を開発した。そして、この技術を用いて、一様に  $\mathbf{d} // \mathbf{l}$  となるテクスチャーが期待される  $100\mu\text{m}$  厚平行平板中の超流動  $^3\text{He-A}$  相中で、位相欠陥の可視化に成功した。得られた MRSI 画像では、幅約  $300\mu\text{m}$  の直線状領域が周囲と異なる周波数であり、 $R_T^2 = 0.9 \sim 0.97$  に対応する構造が存在することが分かった。これは Maki らによって提案された、磁気双極子エネルギーと勾配エネルギーの競合によって決定される距離  $\xi_D$  ( $\sim 10\mu\text{m}$ ) 程度の幅を持つドメインウォールである composite soliton の  $R_T^2 = 0.7 \sim 0.8$  とは大きく異なっている[2]。

観測された位相欠陥の特徴を説明するモデルとして、空間のほぼ全領域で  $\mathbf{d} // \mathbf{l}$  となっているような「Dipole-Locked Soliton」を考案した(Fig.1)。これは容器表面に束縛された surface chiral domain wall により安定化される構造である。なお、chiral domain wall については、Ikegami らが超流動  $^3\text{He-A}$  相の自由表面上における観測を主張している[3]。数値解析によりテクスチャーの詳細な構造を計算したところ、surface chiral domain wall の周辺で  $\mathbf{d}$  と  $\mathbf{l}$  が  $D \sim 100\mu\text{m} \gg \xi_D$  の距離スケールでゆっくりと空間変化するテクスチャーが安定化し、soft core の領域に局在するスピนว波は  $R_T^2 = 0.95$  になるという結果が得られた。これは実験結果とよく一致している。

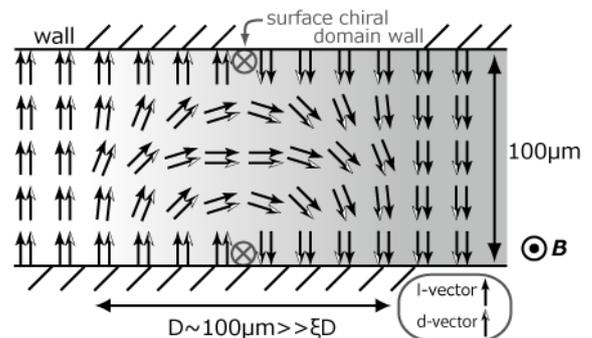


Fig. 1. Schematic of “Dipole-Locked Soliton.”

**References** [1] C. M. Gould and D. M. Lee, Phys. Rev. Lett. **37**, 1223 (1976).

[2] K. Maki and P. Kumar, Phys. Rev. Lett. **38**, 557 (1977).

[3] H. Ikegami, Y. Tsutsumi, and K. Kono, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 044602 (2015).

# イッテルビウムフェルミ同位体を用いた 基底状態と準安定状態のフェッシュバッハ分子の生成

量子光学研究室 坂本迅

**Abstract** Novel Feshbach molecules consisted of an atom in the ground state ( $^1S_0$ ) and an atom in the metastable state ( $^3P_2$ ) were created. From the conversion rate from the atoms to the molecules, the atom temperature before creating the molecules was estimated to be about 0.4 times the Fermi temperature.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

散乱長を外部磁場により変化させるフェッシュバッハ (Feshbach) 共鳴は大変重要な手法であり、アルカリ原子などを用いた研究で大いに利用されている。ただし、この磁場 Feshbach 共鳴はイッテルビウム (Yb) などの二電子系原子の電子基底状態では存在しない。一方、ごく最近、本研究室においてフェルミオン  $^{171}\text{Yb}$  原子の電子基底状態 ( $^1S_0$ ) と準安定状態 ( $^3P_2$ ) 間の磁場 Feshbach 共鳴が発見された[1]。これを利用して、たとえば強い引力相互作用を誘起することによりフェルミ超流動状態の実現が期待されている。特に  $^1S_0$  および  $^3P_2$  の2つの状態間を1光子励起によって結合することによりスピン軌道相互作用の実装が可能である[2]。この s 波フェルミ超流動とスピン軌道相互作用を組み合わせることによりこれまで実現されていないトポロジカル超流動体を実現できるとの理論提案[3]もあり、非常に興味深い研究対象である。

本研究では、 $^1S_0$  状態と  $^3P_2$  状態のクーパー対によるフェルミ超流動状態の実現に向けて、 $^1S_0$  および  $^3P_2$  状態の深くフェルミ縮退した  $^{171}\text{Yb}$  原子団から Feshbach 分子の生成を行った。Feshbach 共鳴では、共鳴を断熱的に横切ることによって Feshbach 分子の生成が可能であり、分子変換効率から分子生成直前における混合原子団の温度を推定することができる[4]。実験ではまず、 $^{171}\text{Yb}$  原子の蒸発冷却の最適化を行った。

冷媒として1成分にスピン偏極した  $^{173}\text{Yb}$  を用いることで、フェルミ温度の 0.2 倍程度以下まで冷却された  $10^4$  個程度の  $^1S_0$  状態の  $^{171}\text{Yb}$  原子団を用意した。その後、励起光により  $^1S_0$  と  $^3P_2$  の混合状態を断熱的に準備し、外部磁場の制御により散乱長を負から正に断熱的に変化させることで、Feshbach 分子を生成した。確認の手法としては、 $^1S_0$  原子と  $^3P_2$  原子、および Feshbach 分子の磁気モーメントの違いを利用して、Time-Of-Flight 中に不均一磁場をかけて分離させる Stern-Gerlach 法を用いた(図 1)。これにより、およそ 50%程度が分子になったと考えられる。これから断熱的に変化させる直前の  $^1S_0$  および  $^3P_2$  原子団の温度はフェルミ温度の 0.4 倍程度と推測される。 $^1S_0$  状態から  $^3P_2$  状態に励起することで温度が上昇したと考えられるが、これは  $^3P_2$  状態原子のトラップロスによる加熱による寄与が大きいと考えている[5]。

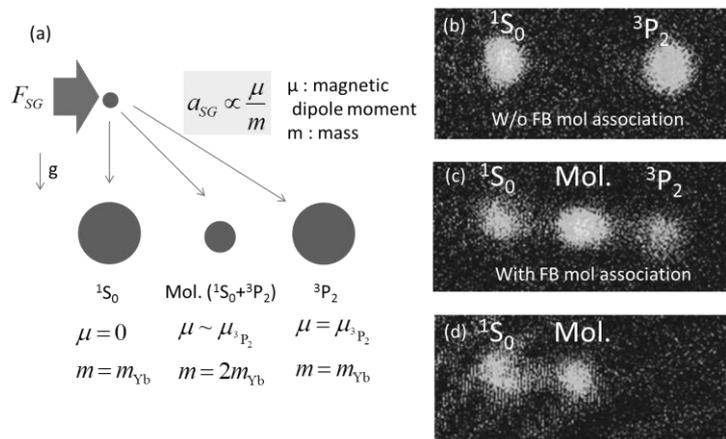


図 1: 断熱的に生成された Feshbach 分子と分子に変換されずに残った原子団。(a) Stern-Gerlach 法の概要。(b) 磁場を断熱的に変化させる直前の原子に対して、Stern-Gerlach 法により  $^1S_0+^3P_2$  原子団を分離したもの。(c) 磁場を断熱的に変化させると、分子(Mol.と書いてあるもの)が現れる。(d) 断熱変化後に  $^1S_0$  原子の成分のみを観測したもの。

## References

- [1] Taie et al., to be appear in Phys. Rev. Lett. [2]中村悠介、修士論文(2012)  
[3] Sato et al., Phys. Rev. Lett 103, 020401 (2009) [4] Hodby et al., Phys. Rev. Lett. 94, 120402 (2005)  
[5] E. Timmermans, Phys. Rev. Lett. 87, 240403 (2001)

# 磁気トルク測定による YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>, YBa<sub>2</sub>Cu<sub>4</sub>O<sub>8</sub> の電子ネマティック状態の直接観測

固体電子物性研究室 下山祐介

**Abstract** We have measured magnetic torque in high temperature superconducting cuprates, YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> and YBa<sub>2</sub>Cu<sub>4</sub>O<sub>8</sub> to detect the in-plane anisotropy of the magnetic susceptibilities. Discontinuous change in slope of the temperature dependence of the magnetic torque amplitude was observed at the pseudogap boundary, suggesting the pseudogap state is an ordered phase.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

銅酸化物高温超伝導体は 1986 年の発見[1]以降、30 年の長きにわたり精力的に研究されてきた。銅酸化物超伝導体の特徴的な現象の一つとして、超伝導転移温度  $T_c$  よりも高い温度である  $T^*$  からエネルギーギャップが開き始める擬ギャップ現象が報告されている。この現象の解釈は二通りあり、長く論争的となっている。一つは超伝導などの前駆現象だと理解する立場、もう一つは、擬ギャップ状態を何らかの秩序相だとする立場がある。近年では YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> のネルンスト係数の面内異方性の測定から、 $T^*$  以下の温度で格子系由来ではない 4 重回転対称性の破れ[2]や、共鳴超音波スペクトロスコピーの実験からは  $T^*$  で共鳴周波数にみられる異常[3]など、後者の立場を支持するような報告がなされている。しかし、熱力学量による回転対称性と相転移を結びつける研究結果はいまだ報告されていない。

本研究では YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> と YBa<sub>2</sub>Cu<sub>4</sub>O<sub>8</sub> の二つの物質に対して、カンチレバー型磁気トルク計を用いた常磁性磁化率の ab 面内の磁気異方性に関する精密測定を、 $T_c$  以上の常伝導状態において行った。磁気トルクは磁化率の異方性と密接に関係する熱力学量であるため、磁気トルク測定は擬ギャップ状態における電子系の回転対称性の変化や、相転移の有無を調べるのに有効な手法である。図 1 に 102.5 K における YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> の磁気トルクの角度依存性を示す。また、得られた磁気トルクの振幅からバックグラウンドを差し引いた振幅の温度依存性を図 2 に示す。測定の結果、磁気異方性が  $T^*$  で折れ曲がりを伴い、低温に向かって増大する振る舞いが観測された。

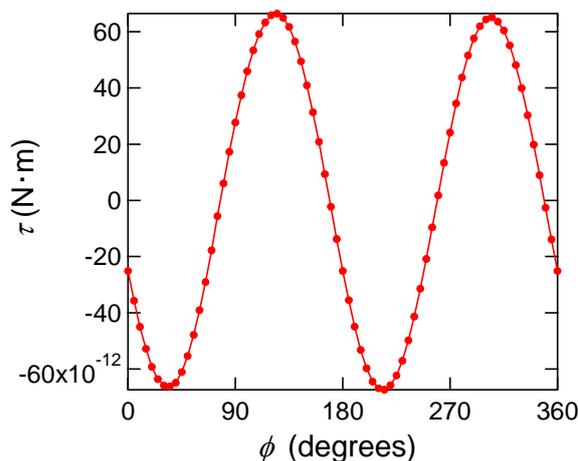


Fig. 1. In-plane field dependence of the magnetic torque of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> at 102.5 K.

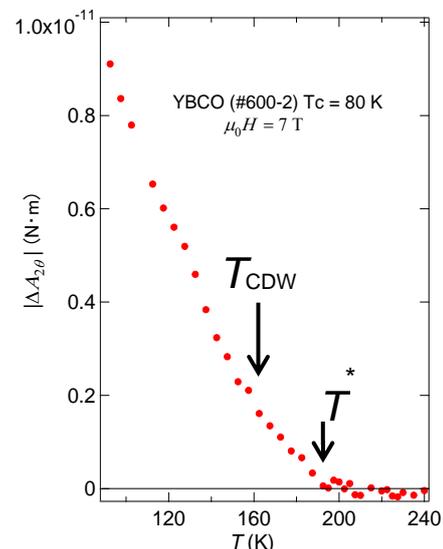


Fig. 2. Temperature dependence of the magnetic torque amplitude.

## References

- [1] J. G. Bednorz and K. A. Müller, *Z. Phys. B – Condensed Matter* **64**, 189-193 (1986).
- [2] R. Daou *et al.*, *Nature* **463**, 519-522 (2010).
- [3] A. Shekhter *et al.*, *Nature* **498**, 75-77 (2013).

# 強磁性体 SrRuO<sub>3</sub>/スピン三重項超伝導体 Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> ハイブリッド構造の電気伝導および磁気特性

Transport and magnetic properties of  
ferromagnet SrRuO<sub>3</sub> / spin-triplet superconductor Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> hybrid structure

固体量子物性研究室 杉本雄亮

**Abstract** We fabricated a hybrid system consisting of ferromagnetic SrRuO<sub>3</sub> and the spin-triplet superconductor Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> with electrically conducting interface. The SrRuO<sub>3</sub> film in this hybrid has a much higher magnetization than the bulk. Moreover, the hybrid exhibits a non-linear transport property ascribed to the penetration of superconductivity to the ferromagnetic film.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

スピン三重項超伝導体 (TSC) と強磁性体の接合では、新奇な近接効果による興味深い現象が理論的に予言されている[1,2]。我々はカイラル  $p$  波 TSC の有力候補である層状ルテニウム酸化物超伝導体 Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> (臨界温度  $T_c \sim 1.5$  K) 単結晶基板と遍歴強磁性体 SrRuO<sub>3</sub> (転移温度  $T_{\text{Curie}} \sim 160$  K) のエピタキシャル薄膜 (ソウル国立大との共同研究) から成る、高い電気伝導性の界面をもつハイブリッド構造の作製に成功した[3]。

我々は、この薄膜の  $T_{\text{Curie}}$  がバルクでの値 160 K とほぼ同じであるにも関わらず、低温での直流磁化が、低スピン状態で期待される  $2.0 \mu_B/\text{Ru}^{4+}$  より大きい  $2.8 \mu_B/\text{Ru}^{4+}$  を示すことを明らかにした (Fig. 1)[3,4]。磁化の値は膜の厚さを薄くするにつれてさらに増大する。この磁化の上昇は基板による薄膜の結晶構造の歪みでは説明できず、何らかの新奇なメカニズムによると考えられる。

次に我々は Au/SrRuO<sub>3</sub>/Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> デバイスの電気抵抗を測定し (Fig.2)、 $T_c \sim 1.3$  K で超伝導転移を観測し、その微分コンダクタンスが 3 つの特性電圧を持つことを見出した。この結果は、Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の超伝導が SrRuO<sub>3</sub> 中に近接効果によって侵入したことを意味している。さらに、超伝導状態で磁化が奇妙な温度依存性を示すことを観測した。この振る舞いは、Ni 薄膜と Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> との構造、ならびに純粋な Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> では観測されなかったため、SrRuO<sub>3</sub>/Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> ハイブリッド構造におけるスピン三重項超伝導と強磁性との共存に起因すると考えられる。

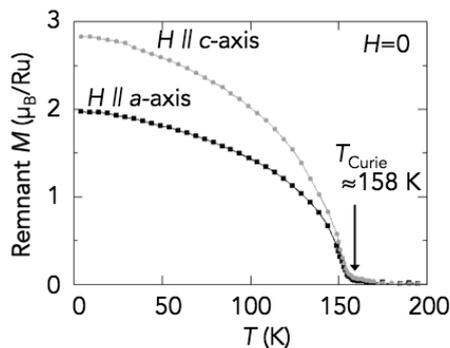


Fig. 1: Temperature dependence of magnetization of SrRuO<sub>3</sub>(50 nm)/Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> measured at zero field after 1 T field cooling. The contributions of the substrate Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> have been subtracted.

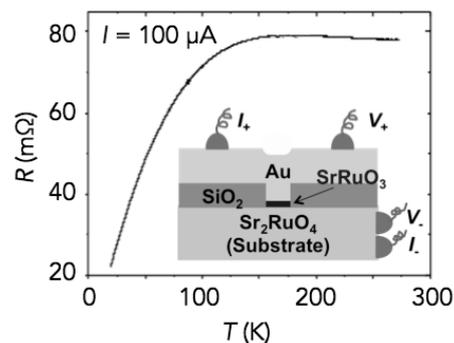


Fig. 2: Temperature dependence of the resistance of Au(600 nm)/SrRuO<sub>3</sub>(15 nm)/Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> measured at zero field with junction area of  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ . Resistance drops at 1.3 K (not shown). Inset shows a schematic image of the present device.

## References

- [1] P. Gentile, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **111**, 097003 (2013).
- [2] P. M. R. Brydon, *et al.*, Phys.Rev. B **88**, 054509 (2013).
- [3] M. S. Anwar, Y. Sugimoto *et al.*, Appl. Phys. Express **8**, 015502 (2015).
- [4] Y. Sugimoto, M. S. Anwar *et al.*, Physics Procedia (in press), arXiv:1508.01628 (2015).

# 量子f-ダイバージェンスの一般化とその情報幾何的性質：誘導される計量および接続

物性基礎論：統計動力学研究室 高岡佑

**Abstract** We generalize the quantum f-divergence, a generalization of the quantum relative entropy, to cover both the quantum relative entropy and the minimal quantum relative entropy as special cases. We also calculate geometrical quantities such as the metric and the connection induced from our generalized quantum f-divergence.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

相対エントロピーは2つの確率分布間の「距離」，すなわち分布の識別のしやすさを表し，統計学の問題である検定論において重要な量である．相対エントロピーの量子版として，量子相対エントロピー：

$$D(\rho||\sigma) := \text{tr}[\rho(\log \rho - \log \sigma)] \quad (1)$$

がある．これは，2つの量子状態間の「距離」，すなわち状態の識別のしやすさを表す量である．このような「距離」としての性質は，量子相対エントロピーにおいて対数関数を一般の作用素凸関数  $f$  で置き換えても成り立ち，それが Petz によって導入された量子 f-ダイバージェンスである [1]．本論文の主題は量子 f-ダイバージェンスの一般化であるが，本アブストラクトおよび発表では，量子相対エントロピーの一般化のみに限って話を進める．量子相対エントロピーは，(i) 非負性，(ii) CPTP 単調性，(iii) 2つの量子状態が可換な場合に古典の相対エントロピーに一致する，という3つの性質をもつ．(i) は量子相対エントロピーが2状態間の「距離」と見なせるための条件であり，(iii) は古典相対エントロピーの拡張と見なせるための条件である．また(ii)は，熱浴からのノイズや測定の反作用によって2つの状態が識別しにくくなることを意味する．このような3つの性質を持つ量子相対エントロピーは，非平衡量子系において，熱浴からのノイズによって失われる情報量や測定によって得られる情報量として用いられる．また量子検定では，誤り確率の漸近的振舞いを特徴付けるのに量子相対エントロピーが用いられる．ところが，上で述べた3つの性質を持つ量子状態空間上の2点関数は一意ではない．量子論においては，状態を表す密度演算子の非可換性によって，量子相対エントロピーに多くのバリエーションが存在する．この事情は，例えば量子検定論という物理的な視点からも理解できる．量子検定においては，測定方法や設定によって，誤り確率の漸近的振舞いを特徴付ける量が変わってくる．その違いが，2つの非可換な量子状態をどのように対数関数の引数として取り込むかに反映されてくるのである．そこで，上で挙げた3つの性質を満たす量子相対エントロピーの一般形は何かということが問題になる．本研究では，通常の量子相対エントロピー(1)を，性質(i)-(iii)を保ちつつ次のように一般化した：

$$D^{g,h}(\rho||\sigma) := \langle \rho^{1/2}, \log(G_\rho^{1/2} H_\sigma^{-1} G_\rho^{1/2}) (\rho^{1/2}) \rangle. \quad (2)$$

ここに， $\langle \cdot, \cdot \rangle$  は Hilbert-Schmidt 内積， $G_\rho, H_\sigma$  はパラメータ関数  $g, h$  を含む適当な超演算子である．一般化量子相対エントロピー(2)は， $g(x) = 1, h(x) = x$  のとき通常の量子相対エントロピー(1)に帰着する．また， $g(x) = h(x) = x$  のとき，松本によって詳しく調べられた最大量子相対エントロピー： $D^{\max}(\rho||\sigma) := \text{tr}[\rho \log(\rho^{1/2} \sigma^{-1} \rho^{1/2})]$  に帰着する．このように，一般化量子相対エントロピー(2)は多くのバリエーションを含む．確率分布や量子状態の空間（以下，統計多様体と呼ぶ）において2点間の「距離」を与える相対エントロピーは，統計多様体上の幾何を扱う分野である情報幾何において最も重要な概念の一つである．それは，統計多様体の性質を特徴付ける計量や接続といった微分幾何的な量が，相対エントロピーの偏微分係数から誘導されるからである．本研究では，一般化された量子相対エントロピーから誘導される計量や接続といった幾何学的量を計算した．その結果，接続が計量的になる条件が  $g = h$  の場合に  $f''(1)/2 + f'''(1)/3 = 0$  と表されることが明らかになった．

## References

[1] D. Petz, Publ. RIMS. Kyoto Univ. **21**, 781 (1985).

# 時間空間分解発光分光による InGaN/GaN 多重量子井戸の動的遮蔽効果の研究

光物性研究室 寺尾 顕一

**Abstract** We study the dynamical screening effect (DSE) in InGaN/GaN MQWs with time- and spatially resolved photoluminescence spectroscopy. DSE-induced spatially inhomogeneity appears under high power excitation. The radiative rate on the dark spot is reduced compared to that on the bright area.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

InGaN/GaN 多重量子井戸は、井戸層と障壁層の格子不整合に起因したピエゾ効果を通して、積層方向に数 MV/cm という巨大な内部電場を有している。これにより、発光波長のレッドシフトや、発光強度の減少を伴う量子閉じ込めシュタルク効果(QCSE)が生じている[1]。そして近年では高強度短パルスレーザーで作られた高密度光励起キャリアが内部電場を遮蔽する動的遮蔽効果(DSE)が生じることも報告されている[2]。またこの物質ではGaとInの格子定数の違いが大きいため、InN-richな領域の存在や、内部電場強度の揺らぎなど、高い空間不均一性が存在することが知られている。しかしこれまでに、InGaN/GaN 量子井戸特有の不均一性が、動的遮蔽効果の現れる高いキャリア密度のもとで、どのように発光に現れてくるのかは調べられていない。そこで我々は、高強度励起下におけるInGaN/GaN 量子井戸の発光の空間不均一性について、空間分解発光測定、時間分解発光測定の方法により調べた。

励起強度  $3.1 \text{ mJ/cm}^2$ 、 $0.032 \text{ mJ/cm}^2$  における空間分解発光により得られた発光スペクトルから、全積分発光強度を2次元マップした結果を Fig. 1 に示す。励起強度  $3.1 \text{ mJ/cm}^2$  の場合には、 $0.032 \text{ mJ/cm}^2$  のときには見られない、発光強度の特に弱い場所(B)が存在することが分かった。本研究で観測された空間不均一性は、高強度励起下においてのみ現れる点、不均一性のサイズが数  $10 \mu\text{m}$  スケールと大きい点から、これまでに報告されている InN-rich な領域による不均一性[3]とは異なるものであり、動的遮蔽効果が生じる高強度励起下特有の空間不均一性であると考えられる。この不均一性について詳細に調べるために、Fig. 1(a)の2点 A、B の場所で、励起強度  $2.5 \text{ mJ/cm}^2$  において時間分解発光測定を行なった。Fig. 2(a) に A における時間分解発光スペクトルを示す。励起直後  $0 \text{ ns}$  で  $2.8 \text{ eV}$  付近のピークが顕著に現れており、遅い時刻では  $2.6 \text{ eV}$  付近のピークが支配的になっている。これらはそれぞれ動的遮蔽効果、量子閉じ込めシュタルク効果を伴う発光ピークである。Fig. 2(b) に A、B での励起直後  $0 \text{ ns}$  の発光スペクトルを示す。B の場所のスペクトルでは A に比べ発光強度が5分の1程度に減少している。すなわち、高強度励起下において現れる発光強度の弱い場所は、動的遮蔽効果が周りの場所と比較して顕著に弱く、再結合レートもそれに伴い減少していることを示している。

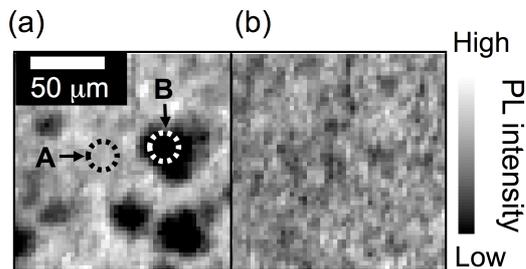


Fig. 1. Photoluminescence (PL) maps of the integrated intensity under (a)  $3.1 \text{ mJ/cm}^2$  and (b)  $0.032 \text{ mJ/cm}^2$

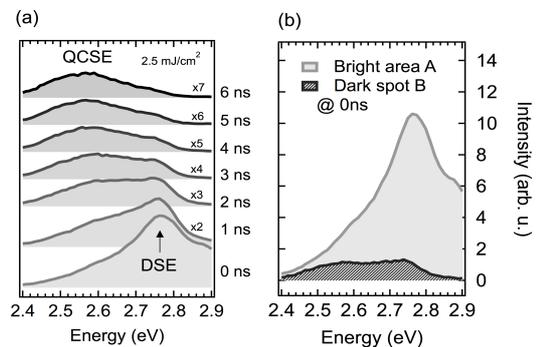


Fig. 2 (a) Time-resolved PL spectra at spot A. (b) Time-resolved PL spectra on  $0 \text{ ns}$  at spot A and B.

## References

- [1] V. Fiorentini *et al.* Physical Review B **60** 8849 (1999)
- [2] D. Turchinovich *et al.* Physical Review B **68** 241307 (2003)
- [3] S. Chichibu *et al.* Journal of Vacuum Science & Technology B **16** 2204 (1998)

# 単一イオン異方性をもつ XY 模型を用いた光格子中の強相関 Bose 原子気体が示す集団励起の減衰の解析

物性基礎論：凝縮系物理 長尾一馬

**Abstract** We study the collective modes in a superfluid phase of the Bose-Hubbard model at finite temperatures. In the particle-hole symmetric region and near the Mott insulating phase, we consider not only the Nambu-Goldstone mode but also the Higgs mode. We obtain analytic formulae for the damping rates of these modes.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

光格子にトラップされた超流動 Bose 原子気体がもつ素励起として、秩序変数の振幅自由度の変調に対応した Higgs モードが注目を集めている (Fig. 1)。Higgs モードは、系が連続対称性を自発的に破り、なおかつ粒子・正孔対称性を持つときに現れる有限のエネルギー・ギャップを持った集団励起モードであり、冷却原子系のみならず超伝導体や磁性体中にも見出される普遍的な固有振動モードである [1]。Bose 原子気体の場合、粒子・正孔対称性は、系の平均粒子数が整数で、なおかつ Mott 絶縁相への相転移点に十分近い領域において現れる。Mott 相の近傍は粒子間に働く相互作用が大きい強相関領域であり、Higgs モードおよびそれが関連する現象を理解することは、強相関領域の Bose 原子気体の素励起を理解することにつながる。

Higgs モードは秩序変数の位相自由度の変調に対応した Nambu-Goldstone モード (以下、NG モード) と結合し、その結果として多種多様な多体効果が Higgs モードと NG モードの性質に現れる (Fig. 1) [2][3]。本研究では、このような相互作用により引き起こされる多体効果のうち、特に有限温度に由来する効果に着目し、集団励起の持つ性質の一つである減衰特性を議論する。特に、Mott 転移点近傍における減衰の性質を調べる。

本研究では、減衰の性質を理解するために、有限温度における Higgs モードの減衰率と NG モードの減衰率をそれぞれ計算した。解析手法として、光格子中の Bose 原子気体を記述する Bose-Hubbard 模型に対する低エネルギー有効模型である単一イオン異方性を持つ XY 模型に基づいた手法 [2] を用いた。この手法では平均場の上に生じるスピン波励起に関する Holstein-Primakoff 展開を用いるので、この展開が正当性を持つように空間次元を 3 次元として計算を行った。この有効模型に対して有限温度の場の理論の方法を応用し、1 ループの範囲内でそれぞれのモードの自己エネルギーの虚部を求めた。これは場の理論の一般論によれば、集団励起モードの寿命に等しい。さらに、場の理論により得られた減衰率の表式を、長波長近似を用いた解析計算とそれを用いない数値計算の方法により実際に評価することで、転移点近傍の減衰の性質を議論した。

得られた結果から、有限温度の効果により、Mott 転移点近傍において Higgs モードが過減衰にならない程度の大きさの減衰率を持つことがわかった。絶対零度においても過減衰にならない程度の減衰率を持ち、その結果が先行研究 [2] の結果と一致することを確認した。

また、NG モードが Mott 転移点近傍に漸近するにつれて大きな減衰率を持つことがわかった。これは絶対零度のときには現れないという意味で、有限温度に由来する振る舞いである。この結果に対してエネルギー・運動量保存則の考察を与えることで、その物理的な描像を明らかにした。

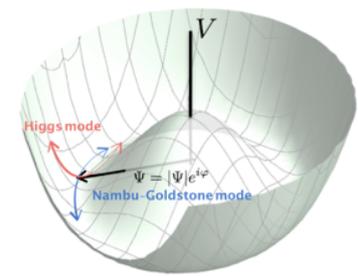


Fig. 1: 秩序変数の変調としての Higgs モードと Nambu-Goldstone モードの概念図。

## References

- [1] D. Pekker and C. M. Varma, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* 2015. 6:269-97.
- [2] E. Altman and A. Auerbach, *Phys. Rev. Lett.* 89, 250404 (2002).
- [3] T. Nakayama, I. Danshita, T. Nikuni, and S. Tsuchiya, *Phys. Rev. A* 92, 043610 (2015).

# 基板パターンに由来する ネマチック液晶の二重安定性

相転移動力学研究室 名倉淳平

**Abstract** We study the behaviors of nematic liquid crystal confined in orientationally frustrated substrates. We found bistable director alignments in checkerboard and fractal patterned substrates. Upon the switching processes, the orientation shows an abrupt change in the checkerboard substrates, while it shows a gradual change in the fractal one. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

ネマチック液晶はディスプレイへの応用等の観点から種々の研究がなされてきた。特に省電力利用に向けてメモリー効果を念頭とした二重安定性を持つ液晶配向は精力的に研究されている[1, 2]。配向の二重安定性とは、液晶の配向に対して2つの基底状態があり、状態間で切り替えできる配向状態を指す。近年、液晶を封入する容器の基板に、チェック模様状に向きを変えたプラナーアンカリングを施すことで、基板平面内に  $45^\circ$  と  $135^\circ$  方向に二重安定な配向状態が現れることが実験的に示された (Fig. 1)

[1]。しかし、その物理的機構については明らかになっていない。また、チェック模様という単一の特徴的なスケールを持つ基板ではなく、様々な長さスケールの混じったフラクタル状基板で、同じような二重安定性が出現するのか、また、その状態間のスイッチングダイナミクスの振る舞いはどうなっているか、という点に着目した研究はほとんどなかった。

本論文ではチェック模様のパターン、および様々な特徴的な長さスケールが入り混じったフラクタル状パターンによって生じる二重安定性を理解するため、数値シミュレーション及び解析的手法を用い研究を行った。数値シミュレーションのアルゴリズムとしてモンテカルロ・メトロポリス法を用い、ハミルトニアンに格子モデルの一つである Lebwohl-Lasher モデル (式 (1)) を採用した[3]。

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} \left\{ \frac{3}{2} (\vec{n}_i \cdot \vec{n}_j)^2 - \frac{1}{2} \right\} - W \sum_i (\vec{n}_i \cdot \vec{d})^2 \quad (1)$$

$\vec{n}_i$  は格子  $i$  上のディレクター、 $J$  は近接するディレクター間の相互作用、第2項は基板とのアンカリング相互作用を表す。

その結果、いずれのパターンの場合も、 $45^\circ$  と  $135^\circ$  方向に二重安定性を示すこと、パターンの特徴的なサイズが大きいほど二重安定性が強固になることが、シミュレーションからも解析的計算からも明らかになった。また、外場による状態間のスイッチング過程において、チェック模様状基板の系では、配向場は、急激な変化を示すが、複数の特徴的なスケールの混じったフラクタル状基板の系では、スケールの混合性ゆえに、配向場が緩やかな緩和を示すことが分かった。

## References

- [1] J.-H. Kim *et al.*, Appl. Phys. Lett. **78**, 3055 (2001).
- [2] J.-H. Kim *et al.*, Appl. Phys. Lett. **83**, 3602 (2003).
- [3] P.A.Lebwohl, G.Lasher, Phys. Rev. A **7**, 2222(1973).

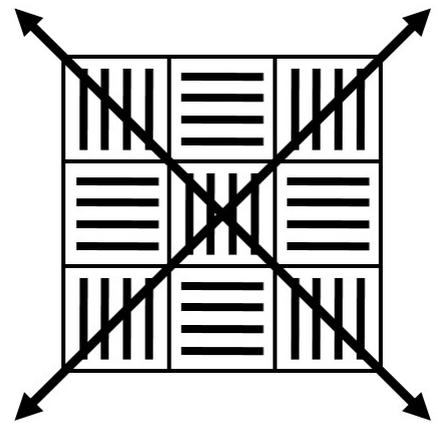


Fig.1. The preferred anchoring directions in a checkerboard substrate. The arrows indicate the bistable directions of the bulk liquid crystal.

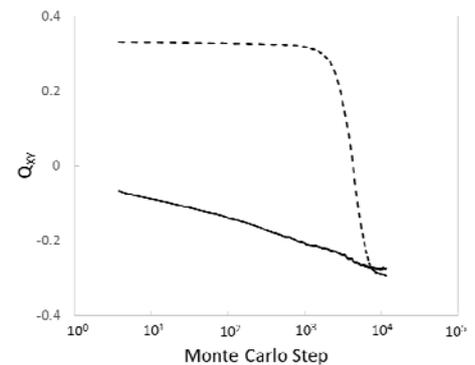


Fig. 2. Time evolution of  $Q_y$  upon the switching processes. The solid and broken lines indicate those for the fractal and checkerboard substrates, respectively.

# 核磁気共鳴法を用いた金属ナノ粒子の研究

固体量子物性研究室 西宮大輔

**Abstract** . We have performed NMR measurement on Ru nanoparticles, and found that the nuclear spin-lattice relaxation rate  $1/T_1$  is enhanced below 10 K with a broad peak around 2.5 K in nanoparticles with  $d \leq 4.6$  nm. From the comparison with the NMR spectrum, the enhancement of  $1/T_1T$  suggests the development of antiferromagnetic fluctuations.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

金属をナノサイズまで小さくするとバルク状態では観測されないナノ粒子特有の現象が現れる。その一例として、表面効果や久保効果<sup>[1]</sup>、磁性金属のナノ粒子では超常磁性<sup>[2]</sup>などが知られている。また2013年には、バルク状態では六方最密充填構造(hcp)をとり構造相転移を持たない金属ルテニウムがナノサイズにおいてのみ面心立方構造(fcc)を持つことが報告される<sup>[3]</sup>など、ナノ粒子状態の構造や電子状態、磁性の研究には更なる研究の余地が残されている。

本研究では hcp・fcc 構造の Ru ナノ粒子を Ru 核磁気共鳴(NMR)法を用い、非磁性ナノ粒子の低温での磁気状態とナノ粒子における電子状態を調べることを目的として研究を行った。

その結果、 $^{99}\text{Ru}$  ( $I=5/2$ ) のバルク状態では、核四重極相互作用によって生じる5本のピークが観測されたのに対し、ナノ粒子状態では  $^{99}\text{Ru}$ 、 $^{101}\text{Ru}$  ともに1本のブロードなピークのみが観測された(図1)。このピーク本数の減少は核四重極相互作用に分布が生じて5本のピークが重なったためであると考えられ、ナノ粒子ではバルクとは異なるスペクトルを示すことが明らかになった。さらにピーク本数の粒径依存性から、通常バルク状態からナノ粒子特有の状態への変化が生じるサイズ境界が明らかになった。また、核スピン-格子緩和率  $1/T_1$  測定からナノ粒子では高温領域においてバルク状態よりも大きい値を持つことから、ナノ粒子はバルクよりも高い状態密度を持つということが示唆される。さらに、粒径を小さくするにつれ10 K以下の低温領域では  $1/T_1T$  の上昇が観測された(図2)。しかし、この低温領域においてもNMRスペクトルにおいてピークのシフトが観測されていないことから、Ru ナノ粒子では低温領域で反強磁性的磁気揺らぎが発達していると考えられる。

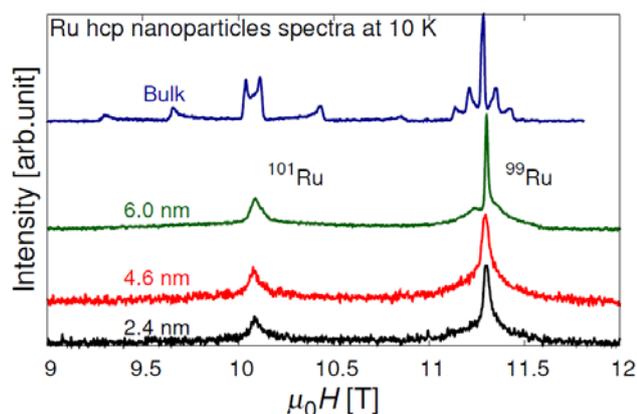


Fig. 1. The size dependence of Ru NMR spectra in hcp nanoparticles. Bulk spectrum shows five peaks in both isotopes, but nanoparticles with the diameter smaller than 4.6 nm shows only one broad peak caused by the inhomogeneity of the electric quadrupole frequency.

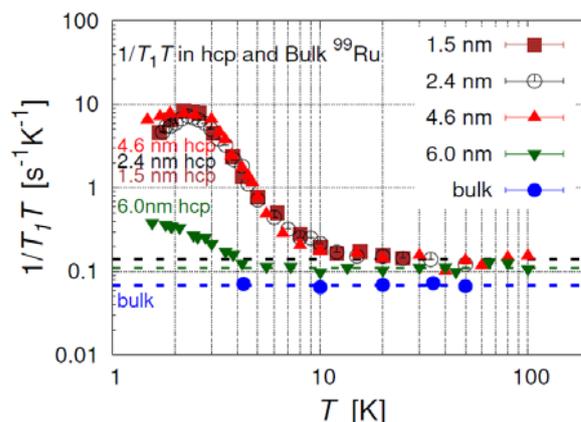


Fig. 2.  $1/T_1T$  in hcp nanoparticles and bulk  $^{99}\text{Ru}$ . Bulk Ru shows the Korrington relation characteristic to the metallic state. On the other hand,  $1/T_1T$  in hcp nanoparticles show an enhancement below 10 K with a broad peak around 2.5 K.

## References

- [1] R. Kubo J. Phys. Soc. Japan. **17** (1962) 975.
- [2] R. N. Bhowmik *et al.*, Phys. Rev. B **69**, 054430 (2004).
- [3] K. Kusada *et al.*, J. AM. Chem. Soc., 2013, 135, 5493-5496.

# 走化性因子の添加で探る バクテリアの孤立波伝播のメカニズム

時空間秩序・生命物理学研究室 長谷川大耀

**Abstract** Solitary wave of bacterial population with modulated chemotactic response was studied. It is known that *Escherichia coli* exhibits solitary wave of their population density through the interplay among chemotaxis, attractant secretion, and food consumption. In order to grasp the essential mechanism of the solitary wave, we analyzed the dependence of wave propagation on the extracellular concentration of glycine that is a major attractant for chemotaxis. Numerical simulation based on Keller-Segel model with logarithmic sensing qualitatively represents the characteristics of the experimental results.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

局所的に集められたバクテリアは、ある条件が重なると一方向的に伝搬する孤立波を形成する。孤立波の形成にはバクテリアの栄養素となる化合物の濃度勾配、そしてアミノ酸や糖の濃度勾配に誘引される走化性に関わることが知られている[1]。これまで、走化性因子がもたらすアクチベーターとバクテリアの集団が栄養素を消費する事によるインヒビターの2つを含む Keller-Segel モデルで、その時空間構造が理解されていた。しかし近年、バクテリアの誘因物質の感知における対数的な依存性の効果が指摘されている[3]。孤立波の形成には走化性応答の特性が強く反映されることから、その応答性は孤立波の様相を大きく変化させると期待される。そこで我々は、バクテリア *Escherichia coli* に関して、誘因物質となるグリシンの濃度を外界雰囲気として 0.1M~1.0M の範囲で変化させる事で、誘引物質に対する感応性を制御し、それによる孤立波の変化を実験および数値計算から解析した。

YFP (黄色蛍光タンパク質) を発現するバクテリアを幅 2mm、長さ 10mm のチャンバーに封入し、スピンドーターで回転させ遠心力で流路の一端に濃縮する。その後、蛍光顕微鏡観察の下でバクテリア集団からの孤立波の形成と、波の先端の伝播速度を測定した。その結果、波の形成は誘因物質であるグリシンの外界雰囲気濃度に大きく依存しており、グリシンの添加量に対して孤立波の形成が抑制されることがわかった(Figs.1 and 2)。ところが、このような波形成の抑制は従来の Keller-Segel モデルでは現れない。そこでモデルにある走化性を表す項  $\nabla c$  を誘因物質の濃度に対して対数的に応答する効果  $\nabla \log(c)$  に改良し、環境のグリシン濃度依存的に孤立波の伝播がどのように変化するかを数値計算から解析した。その結果、実験で見られたようにグリシン濃度が高まるにつれて孤立波の伝播が抑制される結果を再現することに成功した (Fig.3)。対数的な応答特性があると高濃度グリシン存在下では走化性が鈍感になり、細胞密度を局所的に高めるアクチベーションが作用しないためと考えられる。以上の結果は、バクテリアの走化性が孤立波形成に必要な事の新たな検証になると共に、通常の分泌濃度域でパターン形成が鋭敏になるように調整されている事を示唆する。本発表では実験の詳細と数理モデルの数値計算の結果を示し、明らかになったバクテリアの孤立波伝播メカニズムを報告する。

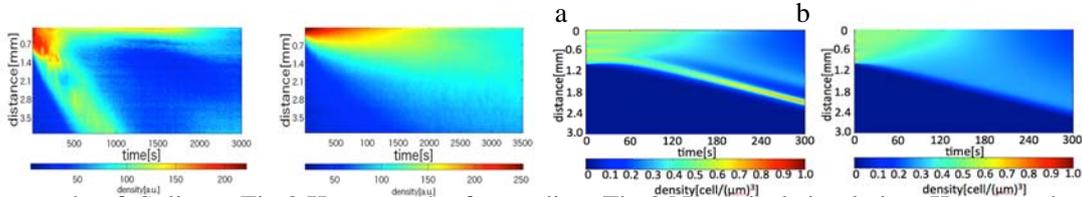


Fig.1 Kymograph of Solitary wave propagation in the absence of glycine. Fig.2 Kymograph of spreading of bacterial population in 1.0M glycine. Fig.3 Numerical simulation. Kymograph of population dynamics (a) in the absence of glycine and (b) in 1.0M glycine.

## References

- [1] J. Saragosti, et al. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108: 16235-16240 (2011).
- [2] H. Salman, et al. *Physical Review Letters* 97: 118101 (2006).
- [3] Y.V.Kalinin, et al. *Biophysical Journal* 96: 2439 (2009).

# 重い電子系化合物 $\text{CeCoIn}_5$ エピタキシャル薄膜の STM/STS 測定

ナノ量子物性研究室 花岡洋祐

**Abstract** By using a combined system of molecular beam epitaxy and scanning tunneling microscopy/spectroscopy, we attempted the *in situ* observation of electronic state at the clean surface of heavy fermion  $\text{CeCoIn}_5$ . We observed hybridization and superconducting gaps at around the defects and step edges as well as at the atomically flat regime.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

層状化合物  $\text{CeCoIn}_5$  は低温において重い電子状態を形成し 2.3 K で超伝導転移する[1]。この物質は、FFLO 状態や量子臨界現象などの多彩な物性を示すことから非常に興味を持たれている。こうした特異な電子状態を詳細に解明する強力な手法の一つが走査トンネル顕微鏡法/分光法 (STM/STS) である。これまでバルク試料を使った STM/STS 測定が行われているが[2,3,4]、 $\text{CeCoIn}_5$  の表面は酸化しやすく、さらにバルク試料の劈開性が悪いために、STM 測定に必須となる清浄かつ原子レベルで平坦な面を得ることが極めて困難であった。

我々は、 $\text{CeCoIn}_5$  のエピタキシャル薄膜を作製できる分子線エピタキシー法 (MBE) と極低温 STM/STS 装置を結合した装置を立ち上げ、電子状態の“その場観察”に世界で初めて成功した。作製した  $\text{CeCoIn}_5$  薄膜表面に数百  $\text{nm}^2$  にわたって原子レベルで平坦な清浄表面を確認し、さらに直線に並んだ単位胞ステップやスクリーディスロケーションなど、薄膜特有の構造が現れることも観測した。図 1 のトポグラフ像に示すように、不純物周りの準粒子干渉による状態密度の“波紋”が確認できるほどの高い空間分解能での表面状態の観察を実現し、同時に図 2 に示すように、局所状態密度に比例する微分コンダクタンススペクトルに、伝導電子と  $f$  電子の混成に伴うハイブリダイゼーションギャップやエネルギースケール 600  $\mu\text{V}$  以下の超伝導ギャップの構造が見えるほどの高エネルギー分解能の測定を可能とした。さらに、試料表面を走査しつつ、各測定点でのトンネル分光を行う“分光イメージング STM”を行うことで、不純物周りや単位胞ステップなどの構造にともなう電子状態の変化を実空間、および波数空間において超高分解能で詳細に捉えられた。

MBE-STM システムを用いることで、バルク試料よりもはるかに短時間で質の良い表面の観測が可能となった。さらにこのシステムを用いれば、非磁性不純物周りに形成される近藤ホールや、重い電子系化合物の単層膜の電子状態・超伝導状態、FFLO 状態における秩序変数の実空間変調の直接観測といった、これまでバルク試料では不可能だった研究が可能になることが期待できる。

## References

- [1] C. Petrovic *et al.*, J. Phys. Condens. Matter **13**, L337 (2001).
- [2] P. Ayajian *et al.*, Nature **486**, 201 (2012).
- [3] M. P. Allan *et al.*, Nat. Phys. **9**, 486 (2013).
- [4] Brian B. Zhou *et al.*, Nat. Phys. **9**, 474 (2013).

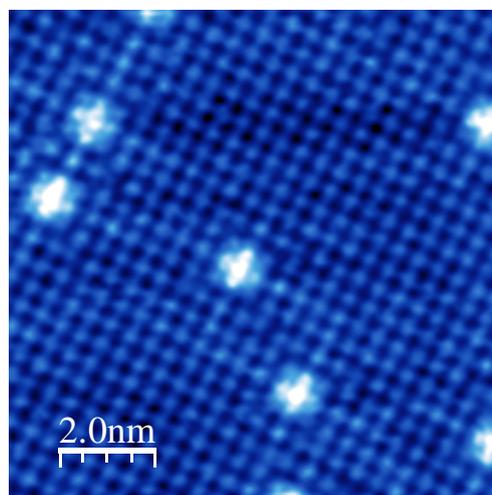


Fig. 1. Topographic image of  $\text{CeCoIn}_5$  thin films with a set-point bias  $V = 20$  mV and current  $I = 500$  pA measured at 4.5 K.

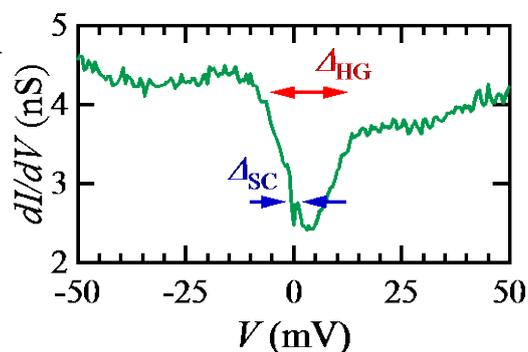


Fig. 2. Differential conductance spectra, measured at 0.4 mK. The hybridization gap ( $\Delta_{\text{HG}}$ ) and superconducting gap ( $\Delta_{\text{SC}}$ ) are clearly observed.

# 一次元可逆セルオートマトンを用いた 佐々形式の有効性の検証

非平衡物理学研究室 深津卓弥

**Abstract** To show the validity of Sasa's work, I derive a macroscopic dynamics from a microscopic one on a simple dynamical system called ERCA (Elementary Reversible Cellular Automata) according to Sasa's formalism. I numerically estimate the range of temperature gradient within which Sasa's formalism is valid.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

自然界には空気や水の流れなどの流体现象が溢れていて、ナビエ・ストークス方程式のような流体方程式はそれを極めて高い精度で記述することができる。この方程式には熱力学的な量である温度や圧力などが出てくるが、これは「熱力学が成立するのは平衡状態である」という前提に真っ向から対立する。通常の方法では局所平衡の仮定にもとづいて天下りの示強変数の場を導入するが、そういった“ごまかし”をしない方法として S.Sasa は[1]でミクロな力学であるハミルトン方程式から流体方程式の導出する方法を得た。この方法（これを佐々形式と称することにする）をセルオートマトンと呼ばれる簡単なモデル上の輸送現象に適用することによってその妥当性を議論したい。

孤立系の緩和過程において初期条件が平衡から大きくずれていた時は摂動のパラメータ（温度差）が大きくなるため線形近似である通常の Green-Kubo 公式は成立しない。しかし佐々形式によって得られるこれに似た式（Green-Kubo-Sasa 公式と呼ぶことにする）は局所的に平衡に近くさえあれば大域的には平衡から大きくずれていても摂動パラメータ（温度勾配）を小さく抑えることができるため成立する。（佐々形式は“上手い”摂動の組み方であるとみなすこともできる。）

ERCA(Elementary Reversible Cellular Automata) と呼ばれるクラスに属する一次元セルオートマトンの内、ルール 26R (wolfram code)と呼ばれるそれは可逆で保存量を持ち、それをエネルギーとみなすことで平衡統計力学が成立する。また、定常状態での熱流  $J$  はフーリエ則  $J = -\kappa \nabla T$  を満たし、熱伝導率  $\kappa$  は Green-Kubo 公式を満たすことが知られている[2]。本研究では緩和過程においてもこの系がフーリエ則を満たし、 $\kappa$  は Green-Kubo-Sasa 公式で計算した結果と一致することを数値実験によって示した。

佐々形式では、まず始めに初期分布を局所平衡（ローカルギブス）分布で与え、系を時間発展させる。ERCA ではリウビユ定理が成り立つので局所平衡分布は不変分布ではなく、分布は時間とともに局所平衡では表せない形に変化していく。この真の分布  $P_t(\Gamma)$  をそれに近い局所平衡分布  $P_{\lambda_t}^{LG}(\Gamma)$  で近似する（ $\lambda_t$  はその時刻における逆温度）。この時この分布間のズレを  $\hat{\Sigma}_t(\Gamma) = \log(P_t/P_{\lambda_t}^{LG})$  と表すと（ハット記号は系の状態  $\Gamma$  に依存する微視的な物理量であることを意味する）、これはエントロピー生成となり、逆温度場の勾配  $\partial_x \lambda$  と同じオーダーになる。逆温度場の勾配が充分小さければこの  $\hat{\Sigma}_t$  でカレントが  $\langle \hat{j} \rangle_t = \langle \hat{j} e^{\hat{\Sigma}_t} \rangle_{\lambda_t} \sim \langle \hat{j} \rangle_{\lambda_t} + \langle \hat{j} \hat{\Sigma}_t \rangle_{\lambda_t}$  と展開できて、これが Green-Kubo-Sasa 公式に対応している。

本研究では、数値計算の結果、セルオートマトンの緩和過程における佐々形式（線形近似まで）の成立範囲が  $|\partial_x \lambda| < 0.02$  であることが分かった。また摂動展開の一次の項  $\langle \hat{j} \hat{\Sigma}_t \rangle$  はカレント関連の空間時間積分であり、これが摂動パラメータと同じオーダーになりシステムサイズがオーダーに含まれないためには  $\langle \hat{j} \hat{j} \rangle$  が有意な値を取る範囲が時間・空間的に局在していることが必要であるが、これを数値計算によって直接確かめた。

## References

- [1] Shin-ichi Sasa, “Derivation of Hydrodynamics from the Hamiltonian Description of Particle Systems,” Phys. Rev. Lett. 112, 100602 (2014).
- [2] Shinji Takesue, “Fourier's law and the Green-Kubo formula in a cellular-automaton model,” Phys. Rev. Lett. 64, 252 (1990).

# 超伝導体 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の核磁気共鳴・核四重極共鳴による研究

固体量子物性研究室 真砂全宏

**Abstract** We have studied a superconductor  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  to reveal the spin symmetry. We found the invariant  $^{17}\text{O}$  Knight shift in the superconducting (SC) state above 1 T and the enhanced  $^{101}\text{Ru}$  nuclear spin-spin relaxation at  $H = 0$ , suggesting the existence of the spin degrees of freedom in the SC state.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

層状ルテニウム酸化物超伝導体  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  は比較的単純な電子構造を有する系でありながら、様々な非従来型の性質を示し、超伝導の対称性や発現機構に関する微視的研究に適した物質である。特にカイラル  $p$  波スピン三重項超伝導状態が実験的に示唆されており[1]、そのスピン自由度に伴うクーパ対のダイナミクス[2]や、磁場—温度相図における複数の超伝導相の存在[3]などが理論的に期待されている。

最近になって、面内磁場の印加によって  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導が通常の軌道対破壊効果で期待されるよりも強く抑制され、低温では超伝導が一次相転移で破壊されることが発見された[4]。この超伝導破壊は上述のスピン三重項対に基づいた理論的枠組みでは予見されておらず、ゆえに低温高磁場下ではこれまでに知られていない新奇な対破壊機構や超伝導と競合する磁気相の存在の可能性も考えられる。さらに、スピン一重項対に伴うパウリ常磁性効果とその超伝導抑制の起源であるという議論もあり、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導対称性に関して完全には決着に至っていない。

我々は  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導電子状態の解明を目指して、単結晶  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  に対する磁場下の  $^{17}\text{O}$  核磁気共鳴 (NMR) 及びゼロ磁場下の  $^{101}\text{Ru}$  核四重極共鳴 (NQR) 測定を行った。電子系の微視的情報を得る手段である NMR・NQR は、超伝導状態の研究において極めて有効である。その結果、 $^{17}\text{O}$  NMR 測定ではナイトシフトが  $\mu_0 H = 1$  T 以上の超伝導状態で減少しないことを明らかにした。これは超伝導が磁場によって強く抑制される領域の近傍においてもスピン帯磁率に変化が見られないことを示唆する。超伝導が破壊される高磁場領域では  $^{17}\text{O}$  NMR スペクトルに異常は見られず、したがって磁気的な相は確認されなかった。これらの NMR の結果は、磁場による超伝導抑制の起源としてスピン以外が寄与する新奇な機構が存在することを示唆する。

また、ゼロ磁場において  $^{101}\text{Ru}$  NQR のスピン・スピン緩和率  $1/T_2$  が超伝導状態で異常に増大する振る舞いを発見した (Fig. 1)。その温度依存性の考察から、 $1/T_2$  の増大の起源は先行研究の  $^{17}\text{O}$  NQR の  $1/T_1$  で観測された異常[5]と同一であると考えられる。 $1/T_2$  も  $1/T_1$  と同様に電子スピンゆらぎを反映する物理量であり、多くの超伝導体ではスピン一重項対の形成によって  $1/T_2$  は減少する。今回の  $1/T_2$  の結果は、超伝導状態におけるスピンドイナミクスの増大を示唆する結果であり、本研究によって  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  では超伝導状態においてスピン自由度が存在することがより確かとなったと考えられる。

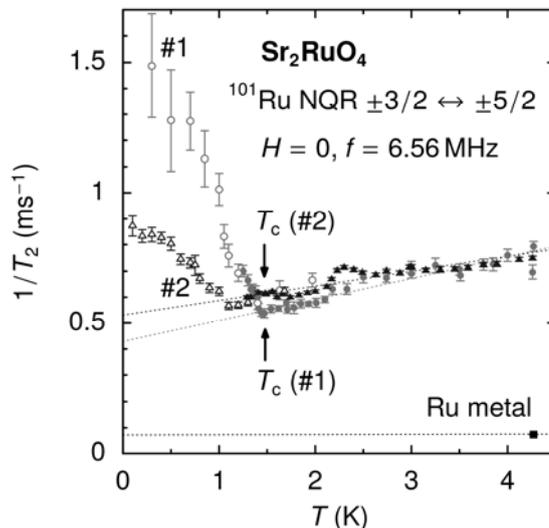


Fig. 1. Temperature dependence of nuclear spin-spin relaxation rate in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  measured by  $^{101}\text{Ru}$  NQR under  $H = 0$ .

## References

- [1] A. P. Mackenzie, and Y. Maeno, Rev. Mod. Phys. **75**, 657-712 (2003).
- [2] K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 024714 (2010).
- [3] Y. Yanase, S. Takamatsu, and M. Udagawa, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 061019 (2014).
- [4] S. Yonezawa, T. Kajikawa, and Y. Maeno, Phys. Rev. Lett. **110**, 077003 (2013).
- [5] H. Mukuda, K. Ishida, Y. Kitaoka, K. Miyake, Z. Mao, Y. Mori, and Y. Maeno, Phys. Rev. B **65**, 132507 (2002).

# アニオン／カチオン界面活性剤の混合系からなる リオトロピック液晶の粘度異常現象と X 線構造解析

ソフトマター物理学研究室 丸山裕也

**Abstract** We investigated the strong temperature dependence of the viscosity near lyotropic nematic phase formed by water solution of the mixture of anionic and cationic surfactants. By measuring the X-ray diffraction and analyzing the swelling behavior, we conclude that the large increase in the viscosity is attributed to nematic-lamellar phase transition.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

一般に界面活性剤水溶液は濃度  $\phi$ 、温度  $T$  に依存して様々な液晶相を示す。本研究では 2 種類の界面活性剤 SDS (アニオン界面活性剤) と DTAB (カチオン界面活性剤) (アニオン／カチオン比を  $\alpha$  とする) を混合した水溶液が、低濃度で示す特異なネマチック (N) 相近傍の相転移挙動に着目した。適当な  $\phi$ 、 $\alpha$  では N 相からの降温過程で急激な粘度変化を示すことがわかった (Fig.1)。

まず、偏光顕微鏡による観察を行ったところ、急激な粘度変化が起こる温度よりも、高温 (低粘度) 側ではネマチック相を示すシュリーレン組織が観察されたのに対し、低温 (高粘度) 側ではそれとは異なる組織が観察された。このことから、低温側では異なる秩序相が発現していると考えられる。一般に単一の界面活性剤からなる水溶液が最も低い濃度で示す秩序相は、棒状ミセルが六方晶状に規則正しく並んだミドル相が知られている。

そこで、会合体の分子集合構造を明らかにするため、X 線散乱実験を行った。散乱プロファイルには、低温で小角に鋭い回折ピークが現れ、急激な粘度変化を示す温度より高温ではこのピークがブロードになった (Fig. 2)。したがって、このピークが反映する周期構造の形成または崩壊が、相転移および粘度変化の起源であると考えられる。

ここで分子集合体の形状は、希釈による膨潤則の次元性と強い関係があるので、構造の周期  $d$  の濃度依存性を調べることにした。 $d$  は散乱強度のピーク位置  $q_{\text{peak}}$  から  $d=2\pi/q_{\text{peak}}$  と求めることができる。2 分子膜構造を持つラメラ相を仮定すると、 $d$  が濃度の逆数  $\phi^{-1}$  に比例し、また比例係数は 2 分子膜の厚み  $\delta$  に相当し、

$$d=\delta\phi^{-1}$$

を満たすと予想されるが、実験結果はこの関係をよく満たす (Fig. 3)。したがって、低温側の相はラメラ相であり、 $\delta=23.8\text{\AA}$  となることも SDS と DTAB の分子長と比較してよく一致するといえる。

以上の結果から、SDS/DTAB 水溶液の N 相近傍で示す急激な粘度変化は、N - ラメラ転移に伴う分子集合構造の変化に起因すると結論できる。また、これまで N 相は棒状ミセルを単位とした  $N_C$  相であると考えていたが、ラメラ相近傍では円盤状ミセルを単位とした  $N_D$  相である可能性が示唆された。

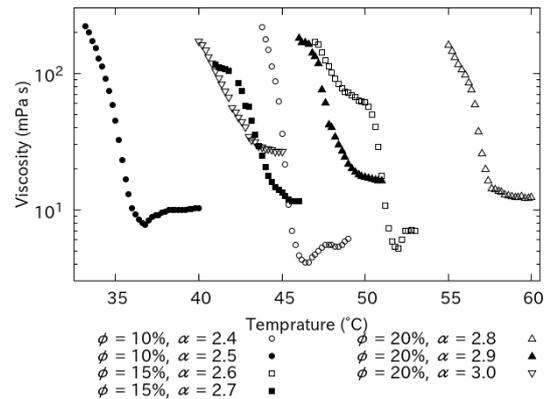


Fig. 1 Temperature and concentration dependence of viscosity.

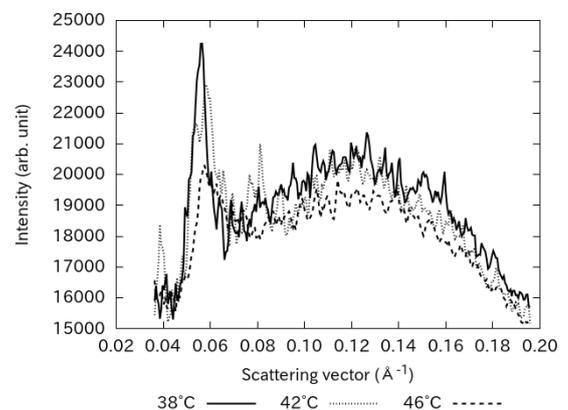


Fig. 2 Temperature dependence of X-ray scattering intensity ( $\phi=20\%$ ,  $\alpha=3.0$ ).

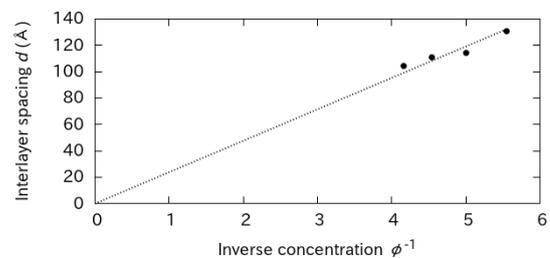


Fig. 3 Concentration dependence of interlayer spacing ( $\alpha=3.0$ ,  $30^\circ\text{C}$ ).

# SQUID アンプを用いた NMR 装置の開発

低温物理学研究室 宮岡 慧

**Abstract** I developed an NMR measurement system using two stage SQUID amplifier to investigate superfluid  $^3\text{He}$  confined in a restricted geometry. The measured signal and noise indicated that we could obtain NMR signal out of  $10^{-5}$  mol of normal Fermi Liquid  $^3\text{He}$ .

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

絶対零度近傍における液体  $^3\text{He}$  は Fermi 縮退した量子多体系で、不純物や格子欠陥のない極めてクリーンな系を実現できる物質である。とりわけ数 mK 以下の超低温度で安定化されるバルクにおける超流動  $^3\text{He}$  の物性は、実験と理論の両面でよく理解されており、その理解を土台として、コヒーレンス長程度の間隔である薄い平行平板間や、多孔質媒体中といった制限空間中に閉じ込めた場合、超流動  $^3\text{He}$  の波動関数にどのような影響があるのかについての研究が盛んに行われている。

こういった量子凝縮状態を探る測定手段の 1 つに、核磁気共鳴 (NMR) 測定があり、この手法は物質のミクロな状態を知るのに強力な手法であるが、超流動  $^3\text{He}$  においては波動関数の内部自由度の空間変化に対応するテクスチャーなどのマクロな状態を知るのにも強力な手法である。制限空間のような小さい体積の中に充填した液体  $^3\text{He}$  から得られる NMR 信号は微小なものである。観測のためには、測定器のノイズを極限まで小さくすることで、シグナルとノイズの比 (S/N 比) を改善する必要がある。本研究では、SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) アンプを用いて、従来用いて来た半導体アンプより飛躍的に低いノイズレベルを実現させる NMR 装置の開発を目指した。

SQUID アンプとは、磁束を検出する素子として SQUID を使用するのではなく、微小電流を増幅する素子として使用するものであり、本研究で使用した 2 ステージ SQUID アンプは  $0.66 [\text{pA}/\text{Hz}^{1/2}]$  という低いノイズレベルを持つ。しかし、SQUID アンプの入力に接続する NMR 信号検出用の共鳴回路における各素子の定数によって、S/N 比が大きく変動することとなる。そのため、共鳴回路の各種パラメータを最適化する必要がある。各パラメータが最適化された共鳴回路を設計し、SQUID アンプと共に NMR 装置へ実装した。SQUID アンプと、 $Q=60$ 、 $f_0=1.2 [\text{MHz}]$  の共鳴回路を  $1.6 [\text{K}]$  で作動させた場合、共鳴周波数近辺におけるノイズ電流は  $9.6 [\text{pA}/\text{Hz}^{1/2}]$  であると期待される。

この SQUID アンプには Josephson Junction Array を利用して、NMR の大振幅励起パルスにより SQUID アンプの動作が妨げられる Dead Time を軽減する仕組みが付加されている。しかしながら、共鳴回路の共鳴周波数で 90 度の励起パルスに相当するパルスを打つと、長すぎる Dead Time のため NMR 信号を検出することができなかった。そのため、レシーバー側の共鳴回路の共鳴点から離れた  $1.8 [\text{MHz}]$  の NMR 信号を、1shot のスピネコーを用いて検出した (Fig. 1)。この信号強度は SQUID アンプの入力コイルに流れる電流に換算すると  $8 [\text{nA}]$  であり、この値は共鳴周波数において NMR 測定を行ったときの  $10^{-4} [\text{mol}]$  に相当する信号である。また、この時のノイズレベルは  $7.7 [\text{pA}/\text{Hz}^{1/2}]$  であった。

また、共鳴回路の共鳴周波数において、バンド幅、温度に対するノイズの測定を行った。現状では共鳴回路のロスに起因するジョンソンノイズが主たる部分であり、より低い動作温度にすることが必要であると考えられる。また、Dead Time の問題などを解決し、入力回路の共鳴周波数で NMR 測定ができた場合には、Fermi 縮退した液体  $^3\text{He}$  に対して 1shot の NMR 測定を行えば、 $10^{-5} [\text{mol}]$  から信号検出できることとなる。

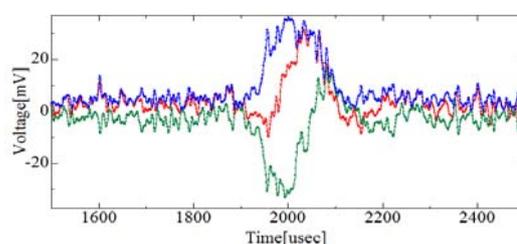


Fig. 1. Spin Echo Signal obtained by SQUID amplifier

# 羽ばたき翼の編隊飛行における非定常流の解析

流体物理学研究室 村上遼

**Abstract** We conducted a three-dimensional numerical simulation of multiple flapping wings in an incompressible potential flow. We found that, to consider beneficial formation flights, it is necessary to include not only the nearest wing-wake interaction, but also other interactions such as wing-wing and long-range.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

大型の鳥の中には、集団で移動する際に V 字の編隊飛行を行うものがある。流体力学的には、前を飛ぶ鳥の羽ばたきによって生じた流れの上昇成分を、後続の鳥が利用することで、エネルギー消費を抑えることができると説明されている。これまで多くの観測が行われてきたが、特に近年、取得できるようになった、群れを成す各個体の詳細な位置データを用いた興味深い報告がなされている [1,2]。しかし、観測・理論・実験のいずれにおいても、流れの非定常性を直接取り扱った群れの運動に関する研究は少ない。

本研究の目的は上記のような背景をふまえ、複数の羽ばたき翼とその後流の相互作用を取り入れた数値計算を用いて、編隊飛行における飛行性能の向上の確認とその性質を解明することである。数値計算には非圧縮ポテンシャル流の解法の一つである Unsteady Vortex Lattice Method (UVLM) を用いた [3,4]。UVLM は特異要素として離散化した渦輪を配置し、その位置と循環の時間発展を求める手法である (図 1a)。流れ場は渦輪の位置と循環から Biot-Savart の法則によって求める。

本研究では、単独飛行に対する揚力係数及び抗力係数の増分を利得と呼び、集団飛行の状況と利得の関係性を検証する。まず、群れの個体数と群れの中の位置が利得に及ぼす影響について調べた。すると、群れの大きさに依らず、利得は先頭から 2 番目で大きく上昇し、中程ではほぼ一様で、最後尾は中程と比べると少し下がるという傾向が見られた。さらに、 $n$  番目の個体 (先頭は  $n = 0$ ) の利得  $B_n$  は次式によってよく再現されることがわかった (図 1b)。

$$B_n = a \sum_{i=0}^{n-1} p^i + b \sum_{i=0}^{N-n-2} p^i \quad (1)$$

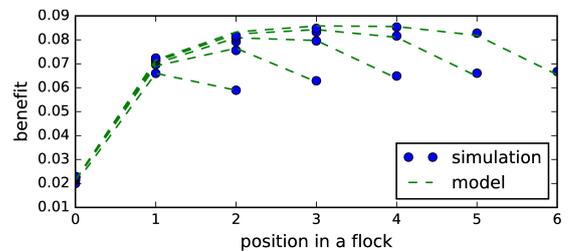
ここで、 $a, b$  はそれぞれ前及び後に隣接する個体に起因する利得で、 $p$  は各利得の相対位置に対する減衰率である。この結果から、後の個体が前の個体に及ぼす利得は無視できないことがわかった。次に、個体間の相対位置と羽ばたきの位相差を変えた時の利得の変化を調べたところ、最適な位置と位相差の関係は揚力・抗力ともに線形であった。この線形の関係は、利得が翼と後流の 2 体の相互作用だけから決まるとする仮定より説明できる。しかし、UVLM の結果より得られた直線の傾きは、予想値とは異なるものであった。鳥の編隊飛行におけるこれらの結果は、翼と後流の 2 体問題に加え、翼同士の相互作用や遠方からの影響をも取り入れる必要があることを示唆している。

## References

- [1] Y. Hayakawa, EPL., **89**, 48004 (2010)
- [2] S. Portugal et al., Nature, **505**, 399-402 (2014)
- [3] J. Katz and A. Plotkin, *Low-Speed Aerodynamics*, (Cambridge University Press, 2001)
- [4] M. Ghommem et al., AERONAUT J., **118**, 485-501 (2014)



(a)



(b)

Fig.1: (a) A snapshot of a formation flight simulation. The roll-up of vortices in the wake can be observed. (b) Lift benefit at each position in a flock for various flock sizes, which is well reproduced by the proposed model.