

平成 2 8 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 7 年 2 月 6 日 ( 月 )、 2 月 7 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）

---

2017年2月6日（月）9：00～17：50

---

## 目 次

1. 密度不均一ナノプラズマの非線形共鳴加熱と膨張ダイナミクスの研究  
浅 和貴（9：00）
2. 光格子中冷却原子の非平衡ダイナミクスの研究  
浅賀 洋人（9：20）
3. 近藤超格子による磁気量子臨界性の制御とエキゾチック超伝導の探索  
石井 智大（9：40）
4. 2軌道SU(N)実験系の構築  
佐藤 浩司（10：00）
5. トポロジカル量子ポンプに対する相互作用及び乱れの効果の研究  
澤田 あずさ（10：20）

---

10：40～10：50 休憩

---

6. 2層正方光格子中の超低温原子集団の研究  
福島 由章（10：50）
7. Sr<sub>3-x</sub>SnOでの超伝導発見と関連超伝導体の探索  
池田 敦俊（11：10）
8. 磁気多極子秩序と共存する超伝導の研究  
角田 峻太郎（11：30）
9. Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>の比熱測定によるネマティック超伝導状態の発見  
田尻 兼悟（11：50）
10. ハロゲン化金属ペロブスカイト太陽電池における光キャリアダイナミクス  
半田 岳人（12：10）

---

12：30～13：30 昼休み

---

11. 単一 CdSe/CdS ナノ粒子のバイエキシトン発光ダイナミクス  
廣重 直 (13 : 30)
12. ブレブ駆動型アメーバ運動の定量解析  
藤原 央典 (13 : 50)
13. 空間反転対称性がない超伝導体の磁場中相図の準古典理論  
弾 雄一郎 (14 : 10)
14. アニオン/カチオン混合系リオトロピックネマチック相におけるミセル構造変化と液晶相転移  
伊田 知里 (14 : 30)

---

14 : 50 ~ 15 : 00 休憩

---

15. エアロジェル中の液体  $^3\text{He}$  の熱伝導測定  
大田 寛也 (15 : 00)
16. CVD 作製単層 MoSe<sub>2</sub> における励起子光物性  
岡広 駿 (15 : 20)
17. テラヘルツ時間領域分光法によるフォノンポラリトンビートの研究  
岡本 茜 (15 : 40)
18. 高分子安定化ブルー相における光誘起 Slippery 界面形成と駆動電圧低減効果  
加藤 省吾 (16 : 00)

---

16 : 20 ~ 16 : 30 休憩

---

19. スメクチック液晶混合系における層構造の競合とソフトニング現象  
佐伯 一帆 (16 : 30)
20. X線小角散乱と MSFT 法を用いた単一クラスターの3次元形状解析  
佐藤 由比呂 (16 : 50)
21. 高純度ダイヤモンドの不純物定量による電子正孔系の散乱機構の研究  
下村 尊明 (17 : 10)
22. 強相関電子系で発現するトポロジカル超伝導についての理論研究  
大同 暁人 (17 : 30)

---

2017年2月7日(火) 9:00~14:30

---

23. UPd<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>における Hc<sub>2</sub> 近傍の超伝導状態  
高木 亮一 ( 9 : 0 0 )
24. 格子ボルツマン法による粘弾性流体の円柱後流の考察  
陳 運開 ( 9 : 2 0 )
25. 熱伝導率測定による量子スピン液体 Pr<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 中の創発電気単極子及び創発フォトンの観測  
寺澤 大樹 ( 9 : 4 0 )
26. CeCoIn<sub>5</sub>/CeRhIn<sub>5</sub> ハイブリッド近藤超格子における超強結合超伝導状態  
成塚 政裕 ( 1 0 : 0 0 )
27. 超流動 3He のドメイン構造の安定性についての研究  
西岡 敬史 ( 1 0 : 2 0 )

---

10:40~10:50 休憩

---

28. 平行磁場下の層状超伝導体の渦格子構造転移  
橋本 和樹 ( 1 0 : 5 0 )
29. 反強誘電性液晶・強誘電性液晶競合系における電気光学応答ダイナミクス  
林 来美 ( 1 1 : 1 0 )
30. アルカリ金属液体の放射光コンプトン散乱測定  
林 浩之 ( 1 1 : 3 0 )
31. <sup>63</sup>Cu-NMR/NQR による単結晶 CeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> の超伝導状態の研究  
樋口 匠 ( 1 1 : 5 0 )
32. 振動現象における発生源の物体推定  
古川 雅博 ( 1 2 : 1 0 )

---

12:30~13:30 昼休み

---

33. 量子カオスの時系列スペクトルに基づく特徴づけ：量子撃力回転子の解析  
三宅 隼斗 ( 1 3 : 3 0 )
34. 光の軌道角運動量による多重極光電場の制御と物質との相互作用の研究  
森本 祥平 ( 1 3 : 5 0 )
35. 画像認識深層ネットワークと脳視覚野の情報処理の比較  
吉田 和輝 ( 1 4 : 1 0 )

# 密度不均一ナノプラズマの非線形共鳴加熱と膨張ダイナミクスの研究

不規則系物理学研究室 浅和貴

**Abstract** We developed a non-uniform density nanoplasma model to analyze the slow energy absorption enhancement observed in the free electron laser (FEL) pump - near infrared laser (NIR) probe experiment of Xe cluster (N~5000)

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

高強度自由電子レーザー (FEL) の開発により、短波長レーザーを用いた強光子場と物質との相互作用の研究が可能になった。特に、短波長短パルスの特性を生かした構造解析などの手法により、ナノメートルスケールでの高速な変化の観測が実現されつつある。一方で、強力な FEL を照射することで、放射線損傷[1]により物質の構造や性質の著しい変化が誘起されるため、FEL 利用研究において放射線損傷過程の詳細を理解することが、研究の高度化に際して重要と考えられる。

本研究では、FEL による放射線損傷過程を研究するために、安定した化学的特性を持ちサイズ変更が容易な希ガス・クラスターに着目した。これまでの研究[2]から、希ガス・クラスターに強力な FEL を照射すると、構成原子の多重イオン化、クラスター内の電子・イオンの多体衝突などの過程を経て高密度のプラズマ球 (ナノプラズマ) を生成し、ナノプラズマは最終的には膨張・崩壊すると考えられている。ナノプラズマ膨張ダイナミクスの時間発展を観測する手段として、FEL と近赤外 (NIR) レーザーによる Pump-Probe 実験が行われている。希ガス・クラスターに Pump 光パルス (FEL) を照射してナノプラズマ生成を誘起し、遅延時間を付けて Probe 光パルス (NIR レーザー) を入射する。Pump 光により生成したナノプラズマの密度は時間とともに低下し、同時に密度によって決まるプラズマ周波数に変化する。プラズマ周波数が Probe 光の周波数と一致すると、表面プラズモン共鳴による著しいプラズマの加熱および加熱に伴うイオン生成の増大を起すと考えられ[3]、イオン生成の変化によりナノプラズマの生成・崩壊の時間発展を観測することが出来ると考えられる。

我々は、Xe クラスター (N~5000) を用いた Pump-Probe 実験 (Pump:  $\lambda = 51\text{nm}$ ,  $I \leq 10^{14}\text{W/cm}^2$ ,  $30\text{fs}$ , Probe:  $\lambda = 800\text{nm}$ ,  $I \leq 10^{13}\text{W/cm}^2$ ,  $30\text{fs}$ ) を行い、ナノプラズマの観測を試みた。我々の実験では、遅延時間が 30ps までの広い範囲でエネルギー吸収の増大が起きているのが確認された (Fig.1: Solid line)。このような振る舞いは従来用いられてきた、均一密度プラズマ球の膨張を仮定する単純なモデルでは説明できない。均一密度のプラズマ球モデルによる計算 (Fig.1: Dotted line) では 2ps 付近に狭いピークを持つ遅延時間依存性が得られ、実験で見られた 30ps まで起きているエネルギー吸収を再現しない。本研究では、非線形共鳴吸収メカニズムの中でも密度不均一性[4]に注目し、イオン化過程を考慮した不均一密度ナノプラズマモデルを開発してエネルギー吸収量を計算した (Fig.1: Dashed line)。複数の密度分布について計算を行い、実験結果との比較を行うことでナノプラズマ分布の推定を行った結果、ナノプラズマに強い非一様な密度分布を示唆する結果が得られた。この結果に基づいて FEL 照射後のクラスター膨張ダイナミクスについて議論する。

## References

- [1] Richard Neutze et al., Nature **406**, 752-757 (2000).
- [2] U. Saalman et al., J Phys B **39** (2006) R39-R77.
- [3] T. Ditmire et al., Phys Rev. A **53**, 3379 (1996).
- [4] C. S. Liu, V. K. Tripathi, and Manoj Kumar, Phys. Plasmas **21**, 103101 (2014)

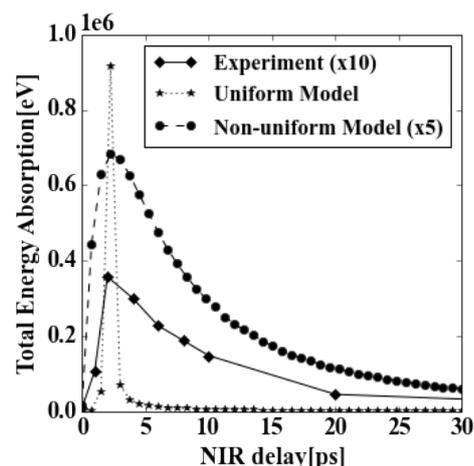


Fig. 1. Delay time dependence of total energy absorption. Solid: experiment, dotted: uniform model, dashed: Non-uniform model.

# 光格子中冷却原子の非平衡ダイナミクスの研究

量子光学研究室 浅賀洋人

**Abstract** We studied non-equilibrium dynamics of an isolated quantum many-body system by performing a sudden quench from a Mott-insulator state to a superfluid state using ultracold atoms in an optical lattice. We observed growth of superfluidity and on-site interaction from which unitarity of the system is experimentally confirmed.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

最近、量子多体系の非平衡ダイナミクスの研究が盛んに行われている。これまでは理論的な研究が大半を占めてきた[1, 2]。また、特殊な状況以外では一般的に数値計算によるシミュレーションが困難な研究である。一方、冷却原子系は孤立量子多体系であり、且つ様々なパラメータを高度に制御できる利点がある。この系を用いることで量子多体系が時間変化する様子を直接的に観測することが可能になり、近年盛んに研究されている[3, 4]。

特に本研究では、孤立した量子多体系である、ボース・ハバードハミルトニアン  $\hat{H} = -J\sum_{(i,j)}\hat{a}_i^\dagger\hat{a}_j + \frac{U}{2}\sum_i\hat{n}_i(\hat{n}_i - 1)$  に従う光格子中冷却原子のダイナミクスに注目した。具体的には、光格子中にボゾンである  $^{174}\text{Yb}$  原子を断熱的に導入し、モット絶縁体状態を初期状態として用意する。その後、光格子ポテンシャルの深さを急激に下げるクエンチをし、そのポテンシャル深さを保持した場合に、系は徐々に超流動状態に変化していく。その変化していく過程について、原子波干渉のピーク幅や明瞭度 (Visibility) といった量からコヒーレンスを、運動量分布から運動エネルギーに関連する量  $K = \sum_{(i,j)}\langle\hat{a}_i^\dagger\hat{a}_j\rangle$  を、そして占拠数分布から二次の相関関数  $G_2 = \sum_i\langle\hat{n}_i(\hat{n}_i - 1)\rangle$  を直接測定した (Fig. 1)。これらの測定量から系が時間変化によりどのように振る舞うか、また、クエンチ後の光格子ポテンシャルの深さや次元性を制御することで、振る舞いがどのように変化するかを明らかにした。特に  $K$  と  $G_2$  から系の全エネルギーを計算することができ、原子集団の拡がりや一定とみなせる場合には孤立量子多体系に期待されるエネルギー保存則を確認することができた。

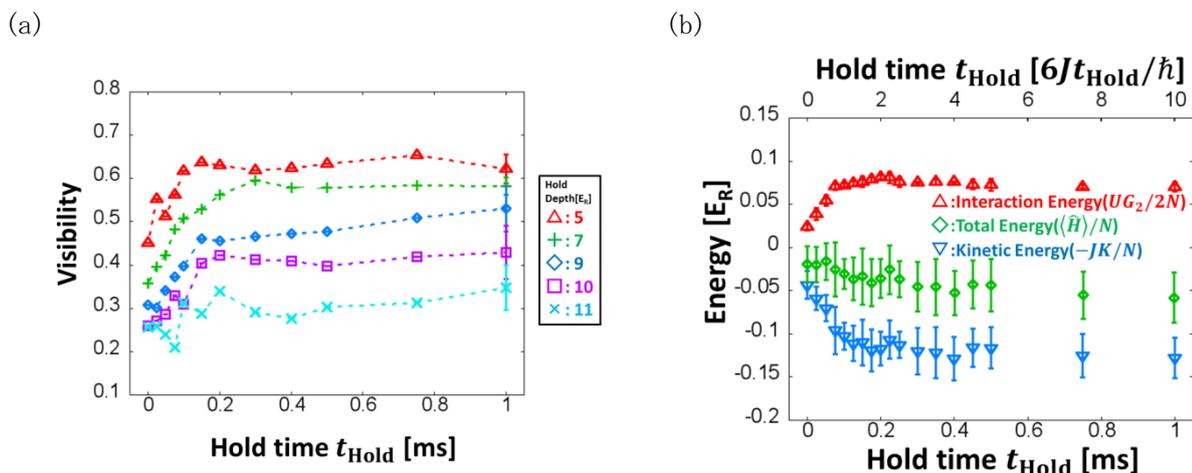


Fig. 1 Time evolution of (a) coherence and (b) energies as a function of hold time  $t_{\text{Hold}}$  after quench.

## References

- [1] H.Tasaki, PRL **80** 1373(1998) [2] M.Rigol et al, PRL **98**, 050405(2007)  
[3] M.Gringer et al, Science **337**, 1318(2012) [4] D.Chen et al, PRL **106**, 235304(2011)).

# 近藤超格子による 磁気量子臨界性の制御とエキゾチック超伝導の探索

量子凝縮物性研究室 石井智大

**Abstract** To explore exotic electronic phases, we fabricate two types of Kondo superlattices,  $\text{CeRhIn}_5/\text{YbRhIn}_5$  and tricolor  $\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5/\text{YbRhIn}_5$ . In  $\text{CeRhIn}_5/\text{YbRhIn}_5$ , magnetic quantum criticality is largely tuned by reduced dimensionality and interface. In  $\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5/\text{YbRhIn}_5$ , superconducting properties of  $\text{CeCoIn}_5$  is dramatically changed by artificially-incorporated inversion-symmetry-breaking, and possible emergence of exotic superconducting phase is suggested.  
© 2017 Department of Physics, Kyoto University

重い電子系化合物は、異方的超伝導や量子臨界現象が観測されるなど、興味深い現象の宝庫である。我々のグループでは、分子線エピタキシーによる重い電子系物質のエピタキシャル薄膜の作製に世界でも初めて成功し、重い電子系と通常金属との超格子（近藤超格子）を作製することで、重い電子の2次元閉じ込め、いわゆる2次元近藤格子の実現に成功した[1]。さらには重い電子系超伝導の2次元閉じ込めを実現し、バルクとは異なる特異なふるまいを示すことが明らかとなった[2,3]。積層構造の設計や界面における空間反転対称性の破れを通じて自然界にはない物質系の創成が可能であり、バルク物質では観測されなかった新奇現象の創発が期待される。本研究では、磁気量子臨界性の制御とエキゾチック超伝導相の探索を目的とし、2種類の新しい近藤超格子を作製した。

重い電子系  $\text{CeRhIn}_5$  と非磁性金属  $\text{YbRhIn}_5$  からなる近藤超格子  $\text{CeRhIn}_5/\text{YbRhIn}_5$  を作製し、 $\text{CeRhIn}_5$  におけるスピン密度波(SDW)の次元性制御ならびに界面の影響を調べた。磁場中電気輸送測定の結果、 $\text{CeRhIn}_5$  層の層数  $n$  の減少、すなわち低次元化に伴い SDW 転移温度  $T_{\text{SDW}}$  が減少し、次元性によって  $T_{\text{SDW}} = 0$  となる量子臨界点 (QCP) に向かって系を制御できることが明らかとなった。更に磁場を印加することで、QCP への精密制御が可能であることを明らかにした。ここで、 $T_{\text{SDW}} = 0$  となる量子臨界磁場に大きな異方性があることを見出したが、その異方性はバルク  $\text{CeRhIn}_5$  とは逆である。理論解析から界面において誘起される Rashba スピン軌道相互作用が重要な役割を果たしていることが示唆される[4]。

重い電子系  $d$  波超伝導体  $\text{CeCoIn}_5$  と2種類の非磁性通常金属  $\text{YbCoIn}_5$  および  $\text{YbRhIn}_5$  を交互積層した超格子、トリコロール（三色）近藤超格子  $\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5/\text{YbRhIn}_5$  を作製した。これにより、2次元強相関電子系の超伝導に対し、人工的に空間反転対称性の破れを導入することが可能となる。このような系はバルク物質では存在せず、前例のないものである。空間反転対称性が破れた超伝導体では様々な特異な超伝導現象が期待されるが、強相関効果ならびに低次元性との協奏効果によって、それら特異な現象の顕在化や、さらなるエキゾチック超伝導相の実現が理論的に指摘されている。超伝導特性として上部臨界磁場  $H_{c2}$  を調べた結果、バルク  $\text{CeCoIn}_5$  とは大きく異なる超伝導特性を示すことが明らかとなった。バルク物質に比べて  $H_{c2}$  が大きく増大し、空間反転対称性の破れの導入に伴い常磁性対破壊効果が大きく抑制されることがわかった。また、面内  $H_{c2}$  では、低温で特異な  $H_{c2}$  の上昇が観測され、ヘリカル相[5]やストライプ相[6]といったエキゾチックな高磁場超伝導相の出現が示唆される。

## References

- [1] H. Shishido *et al.*, *Science* **237**, 980 (2010).
- [2] Y. Mizukami *et al.*, *Nature Physics* **7**, 849 (2011).
- [3] S. K. Goh *et al.*, *Phys. Rev. Lett* **109**, 157006 (2012).
- [4] T. Ishii *et al.*, *Phys. Rev. Lett* **116**, 206401 (2016).
- [5] R. P. Kaur, D. F. Agterberg and M. Sigrist, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 137002 (2005).
- [6] D. F. Agterberg and R. P. Kaur, *Phys. Rev. B* **75**, 064511 (2007).

## 2 軌道 SU(N) 実験系の構築

量子光学研究室 佐藤浩司

**Abstract** We developed an experimental platform for studying two-orbital SU(N) many-body system using metastable state of ultracold ytterbium atoms. With a new vacuum chamber, we successfully achieved a Bose-Einstein condensate of  $^{174}\text{Yb}$  atoms. The lasers for an optical lattice and excitation of ultra-narrow optical transition were also developed.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

近藤効果や重い電子系に代表される、異なる電子軌道間のスピン交換相互作用に起因した現象は凝縮系物理の対象として盛んに研究が行われている。最近、新たな研究手法として、光格子に導入された極低温のアルカリ土類様原子の電子基底状態  $^1S_0$  状態と準安定電子励起状態  $^3P_0$  状態を、異なる軌道の電子とみなした量子シミュレーションの提案[1]がなされている。特に、SU(N)対称性を持つ場合に新奇な量子相が発現すると予想されており[2]、大変注目を集めている。

こうした研究においてアルカリ土類様原子のイッテルビウム(Yb)原子が注目を集めている。核スピンに由来したSU(6)対称性をもつフェルミ同位体  $^{173}\text{Yb}$  の  $^1S_0$  状態の原子と  $^3P_0$  状態の原子間には大きな強磁性スピン交換相互作用[3, 4]が存在する。さらに、スピン交換相互作用の大きさを決める s 波散乱長の磁場による制御法であるフェッシュバハ共鳴があることが理論と実験により示され、新たな BEC-BCS クロスオーバーの研究対象として注目を集めている[5]。本研究室では、これまでYb原子に対して波長532nmの光による光双極子トラップおよび光格子を用いて、様々な量子シミュレーション実験を行ってきたが、この現有の装置では、 $^3P_0$  状態の原子は  $^1S_0$  状態の原子に比べてポテンシャル深さが浅いため大きな困難を伴うことを実験で確認し、また、必要となる高磁場を印加することもできなかった。

本研究において我々は2軌道SU(N)実験のための新たな実験装置を開発した。まず  $^1S_0$ - $^3P_0$  状態間遷移に共鳴する波長578nmの狭線幅光源を開発した。波長1319nmと1030nmの光源から、和周波混合により3kHz以下の線幅で2mWの出力が得られ、実験に用いるのに十分な性能を得られた。次に  $^1S_0$  状態の原子と  $^3P_0$  状態の原子のポテンシャル深さが同じとなる魔法波長759nmの光源を開発した。さらに、 $10^{-11}\text{Torr}$  台の超高真空のチャンバー、および約1kGまでの高磁場発生用のコイルを作製した。この新たに開発した実験装置を用いて、まずボース同位体  $^{174}\text{Yb}$  の高温原子気体を、ゼーマン減速器によって減速し、磁気光学トラップによって  $10^7$  個程度のYb原子集団を用意することができた (Fig. 1)。その後、原子を光双極子トラップに移行し、高い運動エネルギーの原子を取り除くことで冷却を行う蒸発冷却法を用いて、ボース・アインシュタイン凝縮体の生成に成功した (Fig. 2)。さらに、同様の手順で  $^{173}\text{Yb}$  を冷却し、波長759nmの光による光双極子トラップで捕獲できる温度まで冷却することにも成功した。

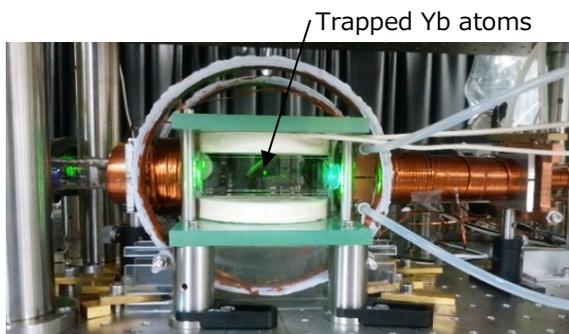


Fig.1. The experimental system.

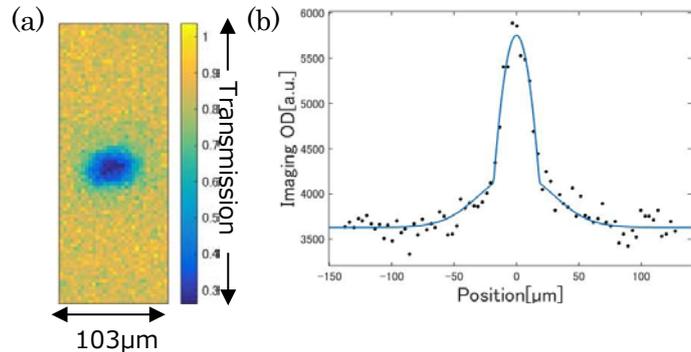


Fig.2. (a) Absorption image of Bose-Einstein condensate of  $^{174}\text{Yb}$  after 10ms of expansion and (b) its density profile along the vertical axis.

### References

- [1] A. V. Gorshkov *et al.*, Nature Physics **6**, 289-295 (2010)
- [2] M.A.Cazalilla and A.M.Rey, Rep.Prog.Phys. **77**, 124401 (2014)
- [3] G. Cappellini *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 120402 (2014)
- [4] F. Scazza *et al.*, Nature Physics **10**, 779 - 784(2014) [5] Ren Zhang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **115**, 135301 (2015)

# トポロジカル量子ポンプに対する相互作用及び乱れの効果の研究

量子光学研究室 澤田あずさ

**Abstract** We studied the effect of interaction and disorder on topological quantum pump using fermionic isotopes of ytterbium atoms in optical superlattices. The pump was robust against interaction as long as an adiabatic condition was satisfied and also against disorder unless the disorder potential was stronger than the long lattice.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

近年、トポロジカル絶縁体をはじめとした非自明なトポロジーを持つ量子系の研究が広く行われている。冷却原子系においても Haldane 模型や Harper-Hofstadter ハミルトニアンの実現などが報告されており[1]、ごく最近、Thouless の提案したトポロジカル量子ポンプが実現された[2][3]。1次元周期系のポテンシャルを周期的に時間変化させた系は、(1+1)次元の周期系とみなすことができ、トポロジカル量子ポンプでは、この時間変化を断熱的に行うことによって1周期ごとに(1+1)次元系に対し定義されたバンドのトポロジカル不変量 (Chern 数) に比例した量の粒子の輸送が誘起される。トポロジカル不変量は連続的な変形の下で不変であるため、このようなトポロジカル不変量で決まる物理量は一般に摂動に強く値が保たれる。しかし相互作用や乱れが強く Mott 転移や Anderson 局在が起こるような場合は摂動の範囲を超え、輸送量に変化しないかは自明ではない。これまで理論的な考察はいくつか報告されているが、実験的な研究はない。

我々は光超格子中のイッテルビウム原子を用いて、相互作用や周期ポテンシャルの乱れがトポロジカル量子ポンプに与える影響を実験的に調べた。格子間隔が 266 nm の短い光格子とその倍である 532 nm の格子間隔を持つ長い光格子を同軸で重ねた光超格子において、長い光格子の位置(位相)を軸方向に掃引することで非自明な(1+1)次元周期系を実現した。先行研究[2]と同様に相互作用のない系としてフェルミオンである質量数 171 の同位体  $^{171}\text{Yb}$  を用いるとともに、それに加えて異なる相互作用領域を調べるために同じくフェルミオンである質量数 173 の同位体  $^{173}\text{Yb}$  を利用し、 $^{173}\text{Yb}$  のスピンを 2 成分に制御したもので斥力系を、 $^{171}\text{Yb}$  と  $^{173}\text{Yb}$  のスピン各 1 成分の混合系で引力系を実現した。また、ポテンシャルの乱れは光超格子の軸に対し  $45^\circ$  の角度で重ねた格子間隔 399 nm の光格子によって導入した。これにより、準周期ポテンシャルが得られる。

まず、相互作用がある場合の実験結果として、十分長い周期に対する輸送量は相互作用のない場合とほぼ同じ値となり、相互作用に対する堅牢性を確認した。また、数値シミュレーション[4]では断熱条件に関して斥力の場合には相互作用のない場合と差異が見られないが、引力の場合は厳しくなることが予測されている。そこで掃引時間依存性を測定した。その結果についても議論する。乱れに対しては、乱れポテンシャルの深さが元の(1+1)次元バンドの最小ギャップより大きな場合でも輸送量は変化しない結果となり、乱れに対する堅牢性を確認した。さらに、輸送が抑制され始めるのは乱れの強さが長い光格子の深さと同程度になった時であることを見出した。発表では上記の結果について報告する。

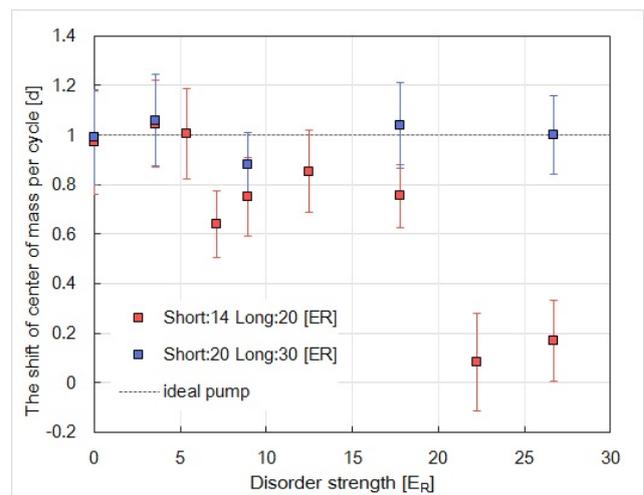


Fig. 1. The shifts of the cloud per 1 cycle for pump as a function of disorder-potential depth.

## References

- [1] N. Goldman *et al.*, Nature Phys. **12** 639-645 (2016) [2] S. Nakajima *et al.*, Nature Phys. **12**, 296-300 (2016)  
[3] M. Lohse *et al.*, Nature Phys. **12**, 350-354 (2016) [4] J. Ozaki and M. Tezuka, private communication

# 2層正方光格子中の超低温原子集団の研究

量子光学研究室 福島由章

**Abstract** By combining two optical lattices, we implement an optical bilayer lattice for which high temperature superfluidity is predicted. We observe the energy band structure with Bragg spectroscopy. We also observe a disconnected Fermi surface characteristic of a bilayer lattice and short-range magnetism on intra-dimer sites.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

Bilayer 格子と呼ばれる2層の正方格子構造(Fig. 1)で、反強磁性的なスピン揺らぎにより、銅酸化物高温超伝導体のモデルである単層正方格子よりも高い温度で超伝導を示すという理論提案がなされた[1, 2]。また、このBilayer 格子のバンド構造は、鉄系超伝導体[3]のバンド構造と類似しており、大変興味深い。そこで我々はBilayer 格子を光格子で実装し、高温超流動を観測することを目標として、研究を行っている。

本研究ではまず、格子定数が2倍異なる2種類の光格子を組み合わせることで2層正方格子を実装した。そこにイッテルビウム原子 $^{174}\text{Yb}$ のボース凝縮体を導入し、Bragg分光によりエネルギーバンドを観測することでBilayer 格子の実装を確認した。また、Bilayer 格子のポテンシャル深さを変化させて運動量分布を測定することにより、超流動-モット絶縁体転移の振舞いを観測した。さらに、フェルミ粒子である $^{173}\text{Yb}$ 原子をBilayer 格子に導入して、層内の $(k_x, k_z)$ 波数空間の擬運動量分布を、バンドの基底状態(対称軌道)と第一励起状態(反対称軌道)においてそれぞれ観測した(Fig. 2)。鉄系超伝導体の電子とホールと同様に[4]、異なる軌道のフェルミ面間が特定の擬運動量移動で結ばれ(ネスティング)、超流動ギャップ関数が両者で反転した $s_+$ 波の対称性をもつと考えられており、Bilayer 格子でネスティングを観測する上で、両状態のフェルミ面を観測したことは大きな意義がある。

また、Bilayer における層間の短距離磁性の観測に成功した。先行研究[5]に従い、 $x$ 方向にスピン成分に依存したポテンシャル勾配をかけることでSpin Singlet 状態とTriplet 状態の間にコヒーレントな振動を誘起し、その時間発展を観測することで両者の占有数差を測定した(Fig. 3)。今後は、超流動転移温度まで冷却することを計画している。

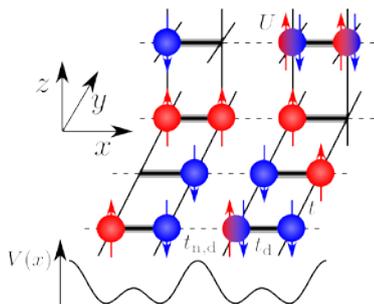


Fig. 1. Bilayer lattice.  $t$ ,  $t_d$ ,  $t_{n,d}$  are inter-dimer tunneling, intra-dimer tunneling, tunneling between

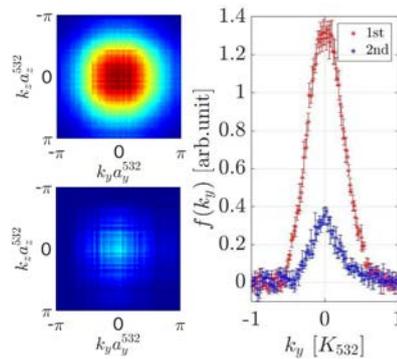


Fig. 2. Quasi-momentum distribution in the 1st band(upper left) and 2nd band(lower left) for  $(k_x, k_z)$  space of

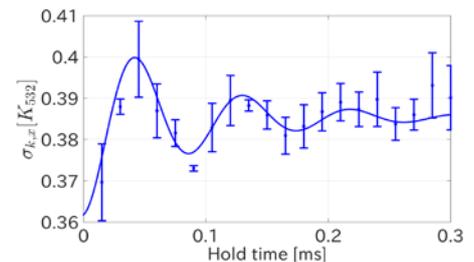


Fig. 3. Width of the quasi-momentum distribution, sensitive to spin singlet-triplet fraction imbalance. The oscillation is caused by a

## References

- [1] K.Kuroki et al., Phys. Rev. B **66**, 184508 (2002). [2] T.A.Maier et al., Phys. Rev. B **84**, 180513 (2011).
- [3] Y.Kamihara et al., J.Am.Chem.Soc **130**, 3296 (2008) [4] K.Kuroki et al., Phys. Rev. Lett **101**, 087004 (2008).
- [5] D.Greif et al., Science **340**, 1307 (2013)

# Sr<sub>3-x</sub>SnO での超伝導発見と関連超伝導体の探索

## Discovery of superconductivity in Sr<sub>3-x</sub>SnO and search for related superconductors

固体量子物性研究室 池田敦俊  
Quantum Materials Laboratory Atsutoshi IKEDA

**Abstract:** We report the discovery of superconductivity in Sr<sub>3-x</sub>SnO, the first superconductor among anti-perovskite oxides. Reflecting its unusual topology of the normal-state band structure, this material has a possibility of exhibiting a topological superconductivity. We also present on our ongoing search for new superconductors in related anti-perovskite-type oxides.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

我々は、逆ペロブスカイト酸化物で初めての超伝導を発見した(図 1)。ペロブスカイト酸化物とは、組成式  $ABO_3$  ( $A$ : アルカリ土類金属や希土類元素、 $B$ : 遷移金属や 14 族元素)であらわされる物質であり、超伝導をはじめとするさまざまな強相関現象の舞台として活発に研究されている。この物質に対する  $A \rightarrow B, B \rightarrow O, O \rightarrow A$  という元素の循環置換によって、逆ペロブスカイト酸化物  $BOA_3 = A_3BO$  が得られる(図 2)。ペロブスカイト酸化物では金属元素を中心に酸素が八面体配位しているのに対し、逆ペロブスカイト酸化物では酸素を中心に金属元素が八面体配位している点で金属元素と酸素の位置が逆になっている。また、電荷中性条件より  $B$  の価数は 4-となる。つまりペロブスカイト酸化物  $A^{2+}B^{4+}(O^{2-})_3$  に対して逆ペロブスカイト酸化物  $B^{4-}O^{2-}(A^{2+})_3$  となり、イオン価数の符号が逆になっている。特に  $B$  が金属元素の場合、負のイオン価数は異常な状態であり、特異な現象を示す可能性がある。

実際、最近になって  $Ca_3PbO$  などのいくつかの逆ペロブスカイト酸化物がバルクのエネルギー分散にディラック錐を持つトポロジカル結晶絶縁体であることが理論的に示された[1, 2]。トポロジーとはモノの形を整数であらわす抽象的な数学の概念であるが、物性物理学では電子の波動関数の「形」に注目して物質を分類し、現象の予言や理解に用いられている。逆ペロブスカイト酸化物における特異なエネルギーバンド構造には、前述の  $B^{4-}$  状態が重要な役割を果たしている。この理論的指摘をきっかけに、逆ペロブスカイト酸化物が注目を集めている[3, 4]。

我々は、Sr 欠損のある Sr<sub>3-x</sub>SnO を合成し、5 K 以下で超伝導を示すことを発見した。また、ホール抵抗の測定より Sr 欠損と整合性のあるホールドープを確認した。さらに理論系研究室との共同研究により、常伝導状態のバンド反転を反映して超伝導状態がトポロジカル非自明になる可能性を指摘した。現在、新たな超伝導体の発見を目指して、関連する逆ペロブスカイト酸化物を探索している。その探索の現状もあわせて報告する。

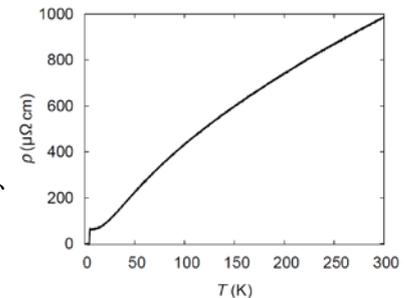


Fig. 1. Temperature dependence of the resistivity of Sr<sub>3-x</sub>SnO [5]. Zero resistivity is observed below ~ 5 K.

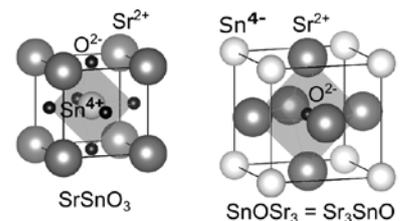


Fig. 2. Comparison of the ordinary perovskite oxide SrSnO<sub>3</sub> and the anti-perovskite oxide Sr<sub>3</sub>SnO. This figure is prepared with the program VESTA.

### References

- [1] T. Kariyado and M. Ogata, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 083704 (2011).
- [2] T. H. Hsieh, J. Liu, and L. Fu, Phys. Rev. B **90**, 081112(R) (2014).
- [3] J. Nuss *et al.*, Acta Cryst. B **71**, 300 (2015).
- [4] Y. Okamoto, A. Sakamaki, and K. Takenaka, J. Appl. Phys. **119**, 205106 (2016).
- [5] M. Oudah, A. Ikeda, J. N. Hausmann, S. Yonezawa, T. Fukumoto, S. Kobayashi, M. Sato, and Y. Maeno, Nat. Commun. **7**, 13617 (2016).

# 磁気多極子秩序と共存する超伝導の研究

凝縮系理論研究室 角田峻太郎

**Abstract** We investigate the exotic superconductivity coexisting with magnetic multipole order, using the models of a one-dimensional zigzag chain and  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$ . Our results pave a new way for studies of superconductivity coexisting with magnetism.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

近年の凝縮系物理学においては、「多極子」という固体内での電子のミクロな自由度が注目を集めている。原子に束縛された電子の全角運動量が固体の中で周囲の影響を受けて多極子に変わる。多極子は偶奇のパリティを持ち、特に偶パリティ多極子に関しては重い電子系の分野で研究が進められてきた。一方で、局所的に空間反転対称性が破れた系において、偶パリティ多極子の反強的な並びとして発現する可能性がある奇パリティ多極子の秩序が注目をされ始めており、理論・実験の両面から精力的に研究が行われている。

空間反転対称性の破れた超伝導体は、従来の BCS 超伝導とは異なる様々な新奇超伝導状態の舞台になる。大域的に空間反転対称性が破れた系では、クーパー対が有限の重心運動量を持つ Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 状態が極小の磁場下で安定化する[1]。しかし実際には、FFLO の秩序変数は渦糸状態に隠されてしまい[2]、実験での観測は難しいと考えられている。そのため、外部磁場を用いずに FFLO 超伝導を観測する方法が期待されている。一方、局所的に空間反転対称性が破れた系では、磁場の向きに応じてペア密度波(PDW)状態[3]や複素ストライプ状態[4]が安定化することが最近の理論研究によって分かってきている。

こうした背景を踏まえ、本研究では様々な磁気多極子に誘起される新奇超伝導状態の発見を目的とする。まず、ミニマルモデルとして局所的に反転対称性の破れた「1次元ジグザグ格子」を採用し、3つの磁気多極子(磁気単極子、磁気双極子、磁気四極子)秩序を分子場として取り入れ、これらと共存する超伝導の解析を行った[5]。その結果、磁気単極子秩序と共存する超伝導は従来の BCS 状態であったものの、磁気双極子状態や磁気四極子状態においてはそれぞれ PDW 超伝導と FFLO 超伝導が安定化するという興味深い結果を示すことができた。特に磁気四極子秩序と共存する FFLO 状態はゼロ磁場で安定化するので、実験で観測するための新たな可能性を見出したと考えられる。

さらに現実の物質に即した研究として、層状ペロブスカイト構造の絶縁体  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  を対象とした計算も行った[6]。この物質では超伝導は実現されていないが、銅酸化物高温超伝導体に似た性質を多く持っていたり、超伝導由来の擬ギャップが見つかったという報告[7]もあつたりすることから、超伝導の実現への期待は大きい。また、いくつかの磁気秩序が実験的に提案されており、中には空間反転対称性を自発的に破る奇パリティの磁気秩序を観測したという例[8]もある。本研究では、それぞれ磁気八極子と磁気四極子に分類される2つの磁気秩序(-+-と-+-+-)に注目し、これらと共存する超伝導が  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  において実現したと仮定する。結果として、-+-状態では磁気的な非共型対称性に守られた非自明な超伝導ノード構造が現れ、-+-+-状態では磁気四極子秩序によってやはり FFLO 超伝導が安定化するということが分かった。

## References

- [1] D. F. Agterberg and R. P. Kaur, Phys. Rev. B **75**, 064511 (2007).
- [2] Y. Matsunaga *et al.*, Phys. Rev. B **78**, 220508 (2008).
- [3] T. Yoshida, *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 134514 (2012).
- [4] T. Yoshida, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 074714 (2013).
- [5] S. Sumita and Y. Yanase, Phys. Rev. B. **93**, 224507 (2016).
- [6] S. Sumita, T. Nomoto, and Y. Yanase, to be submitted.
- [7] Y. K. Kim *et al.*, Nat. Phys. **12**, 37 (2016).
- [8] L. Zhao *et al.*, Nat. Phys. **12**, 32 (2016).

# Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>の比熱測定によるネマティック超伝導状態の発見

## Discovery of nematic superconductivity by specific heat measurements of Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>

固体量子物性研究室 田尻兼悟  
Quantum Materials Lab. Kengo Tajiri

**Abstract** Nematic superconductivity is a new type of superconductivity whose gap amplitude spontaneously breaks the rotational symmetry of the lattice. By measuring the in-plane magnetic-field angle dependence of the specific heat of Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, we observed two-fold symmetric behavior breaking the trigonal crystalline symmetry, providing evidence for the first nematic superconductor.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

本研究において、我々は新しい種類の自発的対称性の破れを伴う「ネマティック超伝導状態」を初めて発見した。本研究で用いた超伝導体は、トポロジカル絶縁体として知られる Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> に Cu をインターカレートして合成される Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> (Fig.1)であり、 $T_c \cong 3.8$  K 以下で超伝導転移を起こすことが 2010 年に報告された[1]。本物質に対するポイントコンタクト実験[2]や NMR 実験[3]から、スピンの自由度が残っていて波動関数がねじれている、スピン三重項トポロジカル超伝導状態の実現が示唆されている。また、母物質 Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> の結晶対称性(三方晶; 点群  $D_{3d}$ )と多軌道性を考慮した上で実現可能な超伝導状態が理論的にいくつか提唱されている[4]。その中には Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> の結晶が持つ  $ab$  面内の三重回転対称性を破った、二重回転対称な超伝導ギャップ振幅を持つ「トポロジカル超伝導状態」も存在している。この超伝導状態が実現している場合、超伝導状態において超伝導電子対が結晶中の対等な三軸のうちどれか一方方向を自発的に選択していることになる。これは、棒状の液晶分子が等方な空間において自発的に一方方向を向いて整列する液晶ネマティック状態になぞらえて、「ネマティック超伝導」と呼ぶべき状態である[5]。

我々はバルク量測定から Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> の超伝導ギャップ構造を特定し、ネマティック超伝導状態が実現しているのかどうかを調べることを目的として、Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> の単結晶試料に対して高精度磁場方向制御下で比熱測定を行った。その結果、超伝導状態においてのみ、比熱の面内磁場方向依存性が結晶の対称性から期待される六回対称(磁場の極性も同一視した場合)の振動ではなく、二回対称の振動を示すことを明らかにした[6]。また、上部臨界磁場の面内異方性に対しても同様に二回対称性が現れることを示した。これらの結果は超伝導ギャップ振幅の構造が結晶の持つ回転対称性を破っていることを意味しており、Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> がネマティック超伝導体であることの初めての証拠である。

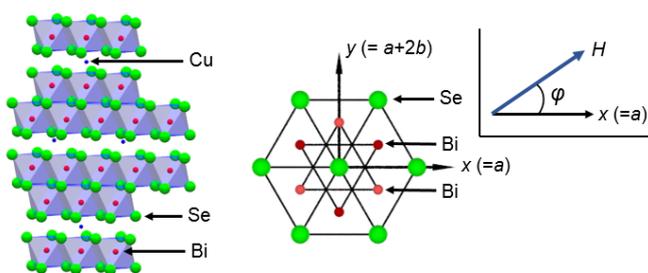


Fig. 1. Crystal structure of Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, having three-fold rotational symmetry in the  $ab$  ( $xy$ ) plane.

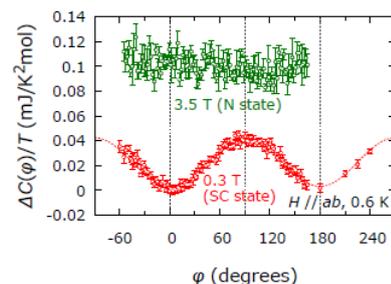


Fig. 2. In-plane field angle  $\phi$  dependence of the specific heat of Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>. Two-fold oscillation is observed only in the superconducting (SC) state.

### References

- [1] Y. Hor *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 057001 (2010).
- [2] S. Sasaki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 217001 (2011).
- [3] K. Matano *et al.*, Nature Phys. **12**, 852 (2016).
- [4] L. Fu and E. Berg, Phys. Rev. Lett. **105**, 097001 (2010).
- [5] L. Fu, Phys. Rev. B **90**, 100509(R) (2014).
- [6] S. Yonezawa, K. Tajiri, S. Nakata, Y. Nagai, Z. Wang, K. Segawa, Y. Ando and Y. Maeno, Nature Phys. doi: 10.1038/nphys3907 (2016).

# ハロゲン化金属ペロブスカイト太陽電池における光キャリアダイナミクス

ナノ構造光物性研究室 半田岳人

**Abstract** We investigated photocarrier dynamics in  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  perovskite solar cells. Using time-resolved photoluminescence and photocurrent measurements, we revealed that the carrier-injection rate from the perovskite layer to the charge-transport layers depends strongly on the photocarrier density. This rate determines the current generation efficiency of the solar cell.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

低温かつ塗布プロセスで簡便に作製できるハロゲン化金属ペロブスカイト半導体は優れた光電変換特性を示すことから、太陽電池をはじめとした様々な光デバイスの新しい材料として世界的に注目を集めている。これまでに多結晶薄膜や単結晶に対して多くの基礎的な研究が行われ、この物質が大きな光吸収係数や長いキャリア拡散長を示し、太陽電池材料として有用であることが示された[1-3]。物質固有の特性は解明されつつあるが、ペロブスカイト半導体をベースとした太陽電池における光キャリア挙動の詳細な理解はほとんど進んでいない。これは、この太陽電池が複数の層（光吸収・電荷生成を担うペロブスカイト薄膜層、そこから電子・正孔を選択的に取り出す電荷輸送層、および電極；Fig.1 挿入図）から構成され、光キャリア挙動が各層の輸送特性や内部電場を反映して複雑になるためである。

そこで本研究では  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ペロブスカイト太陽電池において、時間分解発光(PL)・電界発光・光電流(PC)など複数の測定手法を組み合わせることで、デバイス内部のキャリア挙動の解明に挑戦した。ペロブスカイト太陽電池は空気中の電圧印加で太陽電池特性や発光強度の低下が観測され、その要因が  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  層の欠陥の増加に起因することを明らかにし[4,5]、計測中の劣化を排除できる条件を見出した。さらにデバイス全体の電荷輸送を反映する PC と  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  層内のキャリア再結合・分離を反映する PL を計測することにより  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  層から電子・正孔輸送層へのキャリア注入過程を詳しく議論した。

Fig. 1(a)は、太陽電池の外部量子効率 (EQE; 入射光子数に対する太陽電池から取り出された電子数の比) の励起強度依存性を示している。強励起下で EQE 値は減少することがわかった。これは、多数のキャリアが生成されることにより、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  層から電荷輸送層へのキャリア注入効率が低下したことを示している。Fig. 1(b)に、太陽電池中の  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  層の PL 寿命と、石英上に製膜した  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  薄膜の PL 寿命を示す。低励起強度では、太陽電池試料は薄膜に比べ非常に短い PL 寿命を示す。これは、電荷輸送層への速いキャリア注入に起因する。一方、強励起下では太陽電池の PL 寿命は長くなり、キャリア注入が抑制された[6]。薄膜の PL 寿命は、キャリア密度の増加とともに 2 体再結合過程が支配的となるため、太陽電池の PL 寿命と同程度まで速くなった。以上から、強励起下では遅いキャリア注入と 2 体再結合による発光損失過程が競合し、EQE 値が低下することを明らかにした。PL と PC 測定を組み合わせることで、デバイス性能を決定する複雑なキャリアダイナミクスの解明に成功した。

## References

- [1] S. D. Stranks *et al.*, *Science* **342**, 341 (2013).
- [2] Y. Yamada *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **136**, 11610 (2014).
- [3] Y. Yamada *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **137**, 10456 (2015).
- [4] T. Handa *et al.*, *Opt. Express* **24**, A917 (2016).
- [5] D. Yamashita, T. Handa *et al.*, *J. Phys. Chem. Lett.* **7**, 3186 (2016).
- [6] T. Handa *et al.*, submitted for publication.

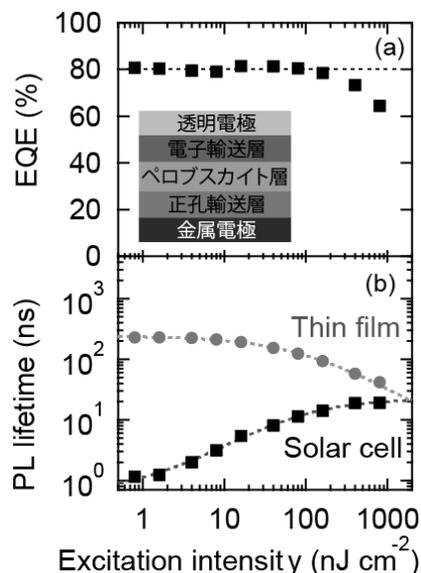


Fig. 1. Excitation-fluence dependence of (a) the external quantum efficiency (EQE) of the solar cell and (b) the PL lifetimes in the solar cell and the thin film. The inset illustrates a schematic image of the solar-cell structure.

# 単一 CdSe/CdS ナノ粒子のバイエキシトン発光ダイナミクス

ナノ構造光物性研究室 広重 直

**Abstract** We have investigated recombination dynamics of biexcitons in single semiconductor nanocrystals using simultaneous measurements of second-order photon correlation and photoluminescence decay curves. We found that, in the giant-shell CdSe/CdS nanocrystals, the radiative recombination rate of biexcitons is enhanced by Coulomb interactions between electrons and holes.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

次世代の光源や太陽電池への応用が期待されているコロイド半導体ナノ粒子の光学的特性に関する研究が近年活発に行われている。1 個のナノ粒子の発光を精密に測定できる単一分子顕微分光を用いることで、ナノ粒子の発光の本質的な特性が明らかにされつつある。特に、発光の 2 次の光子相関 ( $g^{(2)}$ ) を測定することにより単一ナノ粒子中に生成されるバイエキシトンの発光量子効率を決定できる手法が提案され[1]、バイエキシトンの再結合ダイナミクスの詳細が研究できるようになった。

本研究では、 $g^{(2)}$ と発光寿命の同時測定および励起強度の増大に伴う非線形な光学応答などを考慮した新たな解析手法を開発し、単一ナノ粒子中のバイエキシトンの発光寿命や輻射再結合速度を精密に評価できることを示した[2,3]。この新たに開発した実験手法を用いて、高効率発光するシェル層の厚い CdSe/CdS コア/シェルナノ粒子におけるバイエキシトン輻射再結合ダイナミクスの解明を行った。

CdSe コアの半径が 1.6 nm で CdS シェルの厚みが異なる 4 種類の CdSe/CdS ナノ粒子に対して、バイエキシトン発光の量子効率と寿命を同時測定し、輻射再結合速度を評価した。エキシトンに対するバイエキシトンの輻射再結合速度がシェル厚みに依存して増大することが、多数のナノ粒子において観測された (Fig. 1)。シェル層の厚いナノ粒子では正孔が CdSe コアに閉じ込められるが、電子は CdS シェル全体に非局在化する quasi-type II 型のバンド構造を持つことが知られている[4]。輻射再結合速度が電子と正孔の波動関数の重なり積分に比例することを考慮すると、シェル層の厚いナノ粒子中におけるエキシトンおよびバイエキシトンの波動関数は、Fig. 2 のように描写できる。バイエキシトンを構成する 2 個の電子は、2 個の正孔が閉じ込められているコアからの強いクーロン引力によってエキシトンの電子よりもコアに局在し、バイエキシトン発光が高効率化されたものと考えられる。

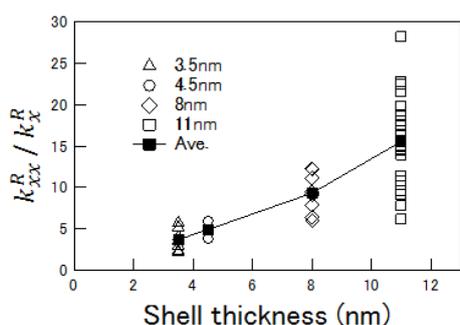


Fig. 1. The ratio of the biexciton ( $k_{xx}^R$ ) to the exciton radiative recombination rates ( $k_x^R$ ) as a function of the shell thickness.

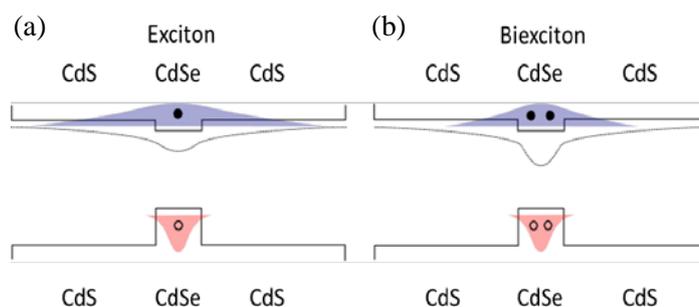


Fig. 2. Schematics of the spatial distribution of (a) an exciton and (b) a biexciton in a giant-shell CdSe/CdS nanocrystal.

## References

- [1] G. Nair *et al.*, Nano Lett. **11**, 1136 (2011).
- [2] N. Hiroshige *et al.*, 2016 MRS Fall Meeting (Boston, 2016) NM4.17.05.
- [3] N. Hiroshige *et al.*, PLMCN17 (Nara, 2016) TuP38.
- [4] F. García-Santamaría *et al.*, Nano Lett. **9**, 3482 (2009).

# ブレブ駆動型アメーバ運動の定量解析

時空間秩序・生命物理研究室 藤原央典

**Abstract** One of cell motion, amoeboid movement includes two types of mechanisms: actin polymerization-driven and bleb-driven. In spite of a long history of research with amoeboid motions, the bleb-driven motion has not fully investigated because of experimental difficulties, e.g. absence of an eligible model cell. We used *A. proteus* as a typical model cell of the bleb driven motion. We found characteristic responses to feeding and light through analyses of their trajectories and deformations.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

生命の最小単位である細胞は自身の機能を果たすために細胞運動を行う。その動的な性質は古くから興味の対象となり、19世紀から現在まで多くの研究が行われてきたが、近年その特徴を物理学的な観点から捉えようという研究が盛んになってきている。細胞は浮遊性および接着性細胞に大別され、我々ヒトを含む多細胞生物のほとんどの細胞は後者の接着性の細胞である。接着性細胞の多くはアメーバ運動といわれる変形と重心移動がカップリングした細胞運動を行う。この運動には二つの運動機構が存在し、それぞれの駆動力はアクチン重合およびアクチンミオシンの収縮（ブレブ駆動）である。近年まで、前者のアクチン重合駆動がアメーバ運動の典型と考えられていたため、アクチン重合依存的なアメーバ運動については重点的に研究されてきたが[1]、後者のブレブ駆動型アメーバ運動に関しては良いモデル生物の不在もあって、ほとんど研究が進んでいない。本研究ではブレブ駆動アメーバ運動を行う細胞である、*Amoeba proteus* を用いてその運動を解析し、アクチン重合駆動との相違の有無を含めて運動の性質を明らかにすることを目的として研究を行った。

*A. proteus* は給餌からの時間や環境光によって運動状態が大きく異なるとの定性的な報告がある。まずはそれらの因子の有無での運動を定量的に測定することからはじめた。例として Fig. 1 に細胞の運動のスナップショットと重心の軌跡を示している。給餌時刻から起算される日数によって、二つの運動状態（静的状態（0日目）、動的状態（1日目以降））に大別されることがわかった。動的な状態については、速度の自己相関関数が double-exponential 型となり、アクチン重合駆動型アメーバ運動と同様の傾向がみられた。一方で静的な状態については初期緩和について動的状態と似た傾向を示すものの全体では大きく異なり、運動の様相自体が異なることを示唆する結果が得られた (Fig. 2)。更に細胞形状に関して円、楕円、三角形…などのフーリエ成分毎に分解し、形状と運動のカップリングについても調べた。発表では給餌や光に対する応答を中心に解析手法及び、得られた結果について議論する。

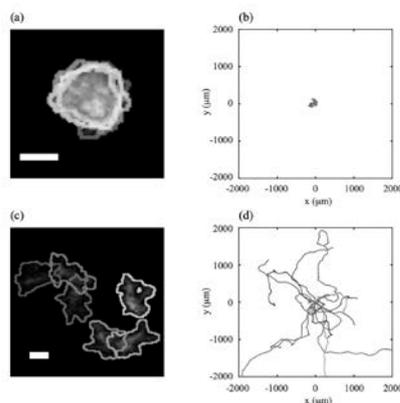


Fig.1. Typical motions and trajectories of *A. proteus* on day 0 (a), (b) and day 1 (c), (d), respectively. Bars are 100  $\mu$  m.

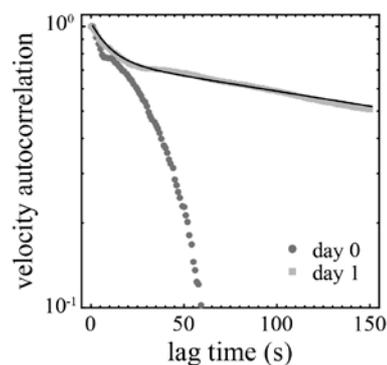


Fig.2. Velocity autocorrelation function of the cell motion on day 0 and day 1.

## References

[1] H. Takagi *et al.*, PLoS ONE 3, e2648 (2008).

# 空間反転対称性がない超伝導体の磁場中相図の準古典理論

凝縮系理論グループ 弾雄一郎

**Abstract** We investigate superconducting states in noncentrosymmetric superconductors under magnetic fields, based on the quasiclassical theory and the Landau level expansion of the order parameter. Some aspects such as the vortex lattice compression and the relation between the magnetoelectric and the paramagnetic depairing effects leading to the transverse magnetization are revealed.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

結晶構造に空間反転対称性を持たない超伝導体は、対称性の破れに起因するスピン軌道相互作用 (SOC) により、Cooper 対のシングレット-トリプレット混合など非従来の性質を示すことが知られており、CePt<sub>3</sub>Si の発見以降、新奇物性を追い求めて精力的に研究されてきた。その中で、これらの系での磁場中現象は特に奇妙な様相を示す。具体的には、(I) SOC が Rashba 型の場合に渦格子が磁場と共に一次構造転移を繰り返すという研究[1,2]や、(II) cubic 型の場合に渦糸方向に変調した渦が横磁化を生むという研究[3]がある。いずれも現段階では理論的示唆にとどまるが、この非従来型超伝導が示す特徴的現象の一つとして、さらに詳細な理論研究や、実験による検証が望まれる。

(I) に関して、同一相内での渦格子の変形は他の超伝導体ではみられない新奇現象として興味の対象となる。先行研究[1,2]で、1 つの相内でも連続的な渦格子の変形が起こることが分かったが、その変形の特徴や詳しい原理はまだ分かっていなかった。また、先行研究では磁場や秩序変数の寄与について低次で切っていたため、より高精度な手法を使うことで相図に関する結果が変わる可能性があった。

一方、(II) については、常磁性対破壊 (PPB) による横磁化と電気磁気効果によるものとの関係があげられる。前者は Houzet 等が空間反転対称性のある超伝導体の FFLO 状態に関連して提唱[4]し、先行研究[3]で反転対称性のない系でも同様の効果が生じることが示されたが、SOC に由来する電気磁気効果からの寄与は計算されておらず、磁場下の超伝導体内で磁場分布に特徴を与える上記 2 つの効果が横磁化を強め合うのか、弱め合うのか、どのようなバランスで出るのかはこれまで知られていなかった。

このような興味のもと、本研究では、見通しよく高精度な計算ができる準古典理論と渦格子を扱うのに適した秩序パラメタの Landau 準位展開を組み合わせた手法を用いて解析を行った。

その結果、(I) については、同一相内での渦格子の圧縮という特徴を見出し、さらにこれが一次転移誘発に関係するという解釈も得た。また、低温高磁場領域で出現する相が以前の GL 近似では正しくとらえられていないことがわかった。加えて、低温側では低磁場領域の構造転移に臨界点が出現するという興味深い結果も得られた[5]。

(II) については、広い物質パラメタ値領域で Houzet 効果と電気磁気効果は横磁化を強め合うことが分かった。一方で、電気磁気効果に対する Houzet 効果の割合は、 $O(10^{-1})$  と小さいことも分かった。加えて、SOC が強いとこの割合がさらに小さくなること、一方で PPB が強くなると、高温側では大きくなり、低温側では逆に小さくなることが分かった。

さらに、これら 2 つの研究結果に対して、SOC と Pauli 常磁性の相乗効果による Fermi 面のずれという観点から解釈を与え、本研究のモデルを超える状況にも適用し得る描像を得ることができた。

## References

- [1] Y. Matsunaga, N. Hiasa and R. Ikeda, Phys. Rev. B **78**, 220508(R) (2008)
- [2] N. Hiasa, T. Saiki and R. Ikeda, Phys. Rev. B **80**, 014501 (2009)
- [3] N. Hiasa and R. Ikeda, Phys. Rev. B **78**, 224514 (2008)
- [4] M. Houzet and V. P. Mineev, Phys. Rev. B **76**, 224508 (2007)
- [5] Y. Dan and R. Ikeda, Phys. Rev. B **92**, 144504 (2015)

# アニオン/カチオン混合系リオトロピックネマチック相 におけるミセル構造変化と液晶相転移

ソフトマター物理学研究室 伊田知里

**Abstract** The shape and size of micelles change depending on the concentration of surfactant and temperature etc. We found the temperature induced phase transition between two different nematic phases (Nd and Nc) consisting of rod and disk like micelles respectively, and investigated the phase transition phenomena by the flow birefringence measurement. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

【概要】一般的に、界面活性剤が水中に溶解すると、その分子が会合することにより様々な形状のミセルを形成する。このミセルの形状は、主に界面活性剤分子の濃度によって変化し、ミセルの形状によってはその水溶液が液晶性をもつことがある。特に円盤状や棒状のミセルが発現するネマチック相 (N 相) は、それぞれ Nd 相、Nc 相として知られている[1]。本報告では、ある種のミセル水溶液が発現する N 相に関して、流動複屈折装置を用いた、周期的振動流動場下における複屈折変化 (流動場変化に対する振幅と位相の変化) を測定して研究を行った。この結果、系の構成要素であるミセル形状が温度に依存して変化することで駆動される二つの異なる N 相 (Nd 相、Nc 相) とその相転移を見出した。

【実験・考察】実験は試料に周期的な振動流動場をかけながらクロスニコル下での透過光強度を測定し、流動複屈折の時間変化 (振幅と流動場の変化に対する位相) を測定した。Fig.1 に流動複屈折測定装置の概要を示す。試料はフローセルに封入し、クロスニコルに対して印加流動方向が  $45^\circ$  となるように配置した。フローセルの一端を周期的に往復する注射筒につないで、空気圧を振動させて試料に周期的な流動を与える。得られる透過光強度の変化は流動場による系の複屈折の時間変化に対応する。Fig.2 に流動複屈折と流動場の時間変化との関係を示す。25°C と 30°C では、流動複屈折の振幅や位相が明らかに変化することが分かった。さらに、流動複屈折による透過光の最大値と最小値の差 (振幅)、及び最大・最小値をとる時の流動周期の位相の温度依存性を解析した (Fig.3)。27.5°C を境に最小値と最大値をとる位相が急激に逆転していること、この前後で振幅は最小値をとることが分かる。このことは、温度に依存してミセルの形状が変化することで、流動速度に対するミセルの配向挙動が変化したと考えられる。これまでの静的な偏光顕微鏡観察では、この温度範囲では 1 つの N 相を示しており、顕著な変化は観測されていなかった。流動場と流動複屈折の時間変化の関係を考察すると、新たに見出された N-N 相転移起源は、ミセル形状が円盤状から棒状に変化するためと結論できる。相転移点で流動複屈折の位相が急激に変化するにも関わらず、その振幅は連続的に転移点直上で極小値を取るなど、この温度誘起の新しい N-N 相転移点近傍の臨界現象に興味もたれる。

**Reference** [1] L.J. Yu, A. Saupe, J. Am. Chem. Soc., 102, 15, (1980)

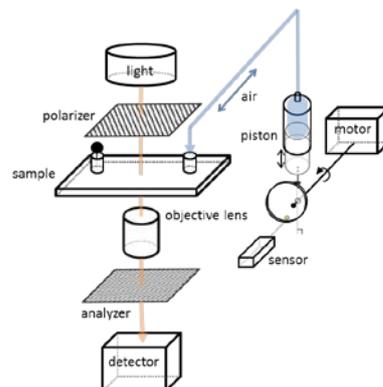


Fig.1 The scheme of flow birefringence measurement.

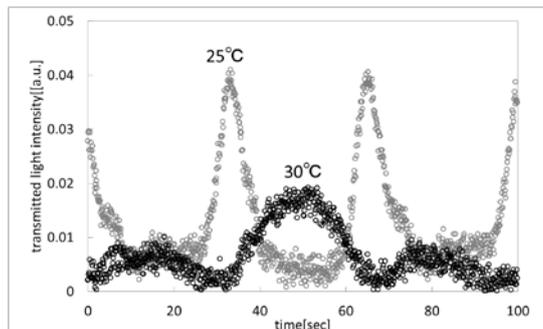


Fig.2 Time dependence of the flow birefringence at 25°C and 30°C.

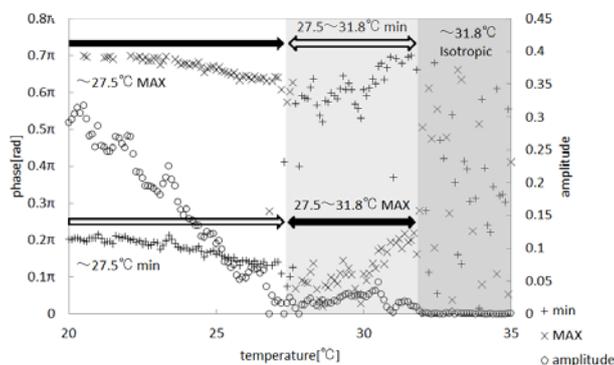


Fig.3 Temperature dependence of the amplitude of flow birefringence and the phases at the minimum and maximum values of flow birefringence.

# エアロジェル中の液体 $^3\text{He}$ の熱伝導測定

低温物理学研究室 大田 寛也

**Abstract** We study transport properties of liquid  $^3\text{He}$  in aerogel. To study the scattering of quasi-particles under different conditions of aerogel surface, we directly measured local temperature distribution of liquid  $^3\text{He}$  in aerogel under heat flow and obtained the thermal conductivity.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

He は非常に量子性の強い物質であることが知られており、液体  $^3\text{He}$  は極低温においてのみ存在する極めてクリーンな物質系である。またバルク液体  $^3\text{He}$  については理論と実験がよく一致し理解が進んでいるため、不純物の存在によって物理的性質がどのような影響を受けるのか研究するのに良い系である。

例えば、エアロジェルはシリカの細い糸が複雑に絡まりあった構造で、95%以上の非常に大きな空孔率を持っている。エアロジェルは超流動  $^3\text{He}$  に対して不純物効果を与え、超流動転移温度の抑制が見られる[1]。またバルク液体  $^3\text{He}$  中の熱とスピンの輸送現象においては準粒子間の散乱が支配的となり、低温では平均自由行程が  $T^{-2}$  で増大し、熱とスピンでは異なる散乱振幅異方性を持つことが知られている[2]。しかしエアロジェル中では、準粒子間の散乱による平均自由行程が低温で増大してシリカの糸の間隔(数 10~100nm)と同程度になると、糸による準粒子散乱が支配的になり、平均自由行程が温度依存性を示さなくなる。熱伝導度  $\kappa$  については、フェルミ速度  $v_F$ 、比熱  $C$ 、平均自由行程  $l$  を用いて、

$$\kappa = \frac{1}{3} C v_F l \quad (1)$$

と書ける。比熱が温度に比例しているため、低温になると熱伝導度はバルクのときには  $T^{-1}$  で増大する一方で、エアロジェル中では  $T$  で小さくなる。

エアロジェル中での熱・スピンの輸送の温度依存性は実験的に測定された例がある[3][4]。しかし熱の輸送の測定では、エアロジェル両端の温度差から熱伝導度を計算しており、エアロジェル-バルク界面の熱抵抗という局所的な影響はモデルを仮定し補正している。そのうえサンプルセルの構造上、エアロジェルを通る経路以外での熱伝導が有意にあることから正確な測定ができていないといえる。

そこで本実験では局所的な温度分布の測定を行うため、Curie-Weiss 則にしたがって低温で発散する帯磁率をもつ固体  $^3\text{He}$  を利用した。エアロジェルの糸表面に数原子層の固体  $^3\text{He}$  を生成し、熱流と同じ方向に印加した磁場勾配下での NMR 信号強度の温度変化から、エアロジェル中の液体  $^3\text{He}$  の温度分布を直接測定することができた(Fig.1)。一方スピンの輸送の測定では、NMR 測定の信号で液体  $^3\text{He}$  と区別できない固体  $^3\text{He}$ [5]がエアロジェルの糸表面に生成するのを避けるため、 $^4\text{He}$  で糸表面をコーティングしている。エアロジェルの糸表面の状態が異なる本実験と平均自由行程の比較をすることで、固体  $^3\text{He}$  が存在することによるエアロジェル中での準粒子散乱の変化を考察することができる。

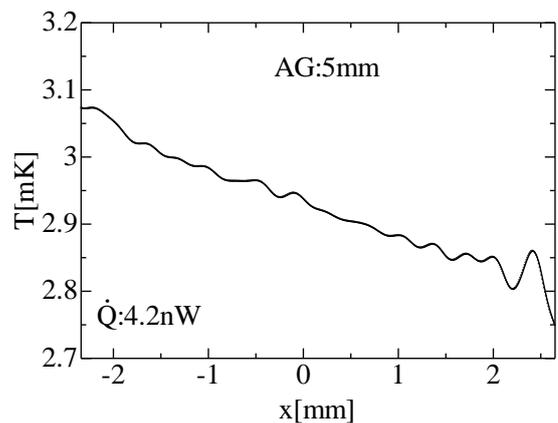


Fig.1 Temperature gradient of liquid  $^3\text{He}$  in aerogel

## References

- [1] W. P. Halperin, H. Choi, J. P. Davis, and J. Pollanen, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 111002 (2008).
- [2] D. Vollhardt, P. Wölfle, “*The Superfluid Phases of Helium 3*” (Taylor & Francis, 1990).
- [3] P. A. Reeves, G. Tvalashvili, S. N. Fisher, A. M. Guénault, and G. R. Pickett, J. Low Temp. Phys. **129**, 185 (2002).
- [4] J. A. Sauls, Yu. M. Bunkov, E. Collin, H. Godfrin, and P. Sharma, Phys. Rev. B **72**, 024507 (2005).
- [5] A. Schuhl, S. Maegawa, M. W. Meisel, and M. Chapellier, Phys. Rev. B **36**, 6811 (1987)

# CVD 作製単層 MoSe<sub>2</sub> における励起子光物性

光物性研究室 岡広 駿

**Abstract** We have studied a monolayer MoSe<sub>2</sub> crystal by absorption spectroscopy, photoluminescence spectroscopy, and Raman scattering spectroscopy. We confirmed that valley polarization cannot be observed in MoSe<sub>2</sub> at room temperature. Mechanism of valley polarization will be discussed from the temperature dependence of exciton luminescence.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

スコッチテープ法によりグラファイトから単原子層グラフェンが剥離されて以来、単原子層物質の作製と物性研究が盛んにおこなわれてきた。その中でも遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDCs) は、単原子層にすることで可視域に直接遷移ギャップが生じることや[1]、発光が励起光の円偏光状態を記憶する“バレー分極”を有する[2]ことや直線偏光状態を保存する“バレーコヒーレンス”を有すること[3]で注目されている。このバレーを新たな物質自由度と捉え、それを用いた記憶デバイスや情報処理分野への応用を見据えた研究も行われるようになった[4]。

TMDCs の 1 種である MoSe<sub>2</sub> では、同じく TMDCs の 1 種である MoS<sub>2</sub> に比べてバレー分極が表れにくいことが知られている[5]。原因として MoSe<sub>2</sub> では光学不活性なダーク励起子への散乱が顕著に起きることが考えられるが、MoSe<sub>2</sub> の励起子の詳細は良くわかっていない。本研究の目的は発光スペクトルや吸収スペクトルを低温領域で詳細に測定することで、MoSe<sub>2</sub> の励起子光物性を明らかにし、それがバレー分極にどう影響を与えるか明らかにすることである。

Fig. 1 に MoSe<sub>2</sub> の常温における吸収スペクトルを示す。1.57eV 付近に A 励起子、1.77eV 付近に B 励起子が確認された。この結果は Dong らの結果[6]とよく一致している。Fig. 2 は常温で、2.33eV のバンド間遷移エネルギーで励起した時の偏光分解発光スペクトルである。1.56eV 付近のピークは単層での A 励起子の発光だと考えられる。ピーク位置は Tonndorf らの結果 1.57eV[7]に比べて 0.01eV ほど違いがあるが、サンプルの生成純度や格子欠陥、基板などの影響によるシフトだと考えられる。また線幅が半値幅で 25meV 程度であり、均一幅だと仮定すれば位相緩和時間 167fs 程の位相緩和過程が存在すると考えられる。この位相緩和過程はバレー間散乱に起因するものと考えられ、この高速のバレー間散乱がバレー分極を顕れにくくする原因だと考えられる。事実、Fig. 2 では偏光依存性は顕れていない。修士論文では、低温での温度依存偏光分解発光スペクトルについて報告し、励起子の散乱過程について議論する。

## References

- [1] Splendiani, Andrea, et al. Nano letters 10.4 (2010): 1271-1275.
- [2] Zeng, Hualing, et al. Nature nanotechnology 7.8 (2012): 490-493.
- [3] Jones, Aaron M., et al., Nature nanotechnology 8.9 (2013): 634-638.”
- [4] 江澤雅彦. 日本物理学会誌 69.11 (2014): 742-743.
- [5] Kumar, Nardeep, et al. Nanoscale 6.21 (2014): 12690-12695.
- [6] Dong, Ningning, et al. Scientific reports 5 (2015).
- [7] Tonndorf, Philipp, et al. Optics express 21.4 (2013): 4908-4916.

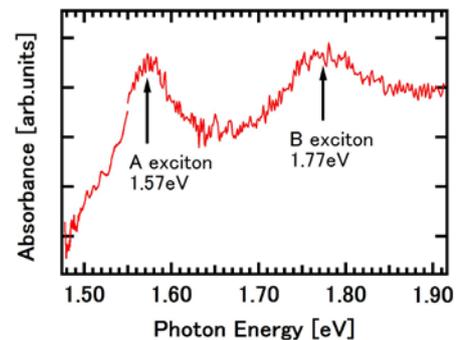


Fig.1. Absorption spectrum of MoSe<sub>2</sub> monolayer at room temperature.

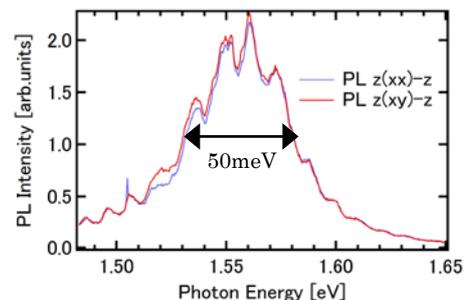


Fig.2. Polarization resolved Photoluminescence (PL) spectra of MoSe<sub>2</sub> monolayer at room temperature. The observed emissions exhibit a single prominent maximum at 1.56eV, which corresponds to A-exciton.

# テラヘルツ時間領域分光法による フォノンポラリトンビートの研究

光物性研究室 岡本 茜

**Abstract** We investigated phonon polariton beats using terahertz time-domain spectroscopy. The beating of the transmitted light is explained by coherent propagation of a pair of upper and lower branch polaritons with the same group velocity. Phonon peak frequency and dephasing constants can be derived from the fitting to Lorentz oscillator model.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

光が物質中を共鳴して伝播するとき、ポラリトンとよばれる電磁場と分極の混合状態が生まれる。光学フォノンとの混合状態をフォノンポラリトンと呼ぶ。厚い試料に広帯域のパルス光を照射して透過光を観測した場合には、共鳴近傍のポラリトンは観測されず、上枝ポラリトンと下枝ポラリトンのうち群速度の一致したものが生み出すポラリトンビートが期待される[1]。しかし、フォノンポラリトンビートを実時間でビートとして観測した例はない[2]。そこで、本研究ではテラヘルツパルスを用いて、物質中におけるポラリトンのコヒーレントな伝播とその減衰について詳細に調べた。

図 1(a)に、スクロース単結晶にテラヘルツパルス照射した際に得られる透過波の時間発展を青実線で示す。入射波（赤点線）には存在しないビート信号が観測された。ビート信号の由来を明らかにするため、入射波、透過波の電場波形をフーリエ変換して得られるパワースペクトルを、それぞれ図 1(b)赤点線、青破線に示す。同時に、ビートが観測された領域のパワースペクトルを黒実線で示す。2 THz に存在するディップはスクロースのフォノン吸収によるものである[3]。ビート部分のパワースペクトル(黒実線)には、フォノン吸収周波数の両側の成分からの寄与が大きいことがわかる。したがって、ビート信号はフォノンによる共鳴周波数成分の強い吸収と上枝・下枝ポラリトンの干渉により生み出されているといえる。

図 1 で得られた試料の誘電応答にローレンツ振動子モデルを適用することで、フォノン振動数や振動子強度といった物質パラメータに加え、これまでの周波数領域の実験では困難だったポラリトンの減衰比を得ることができた。

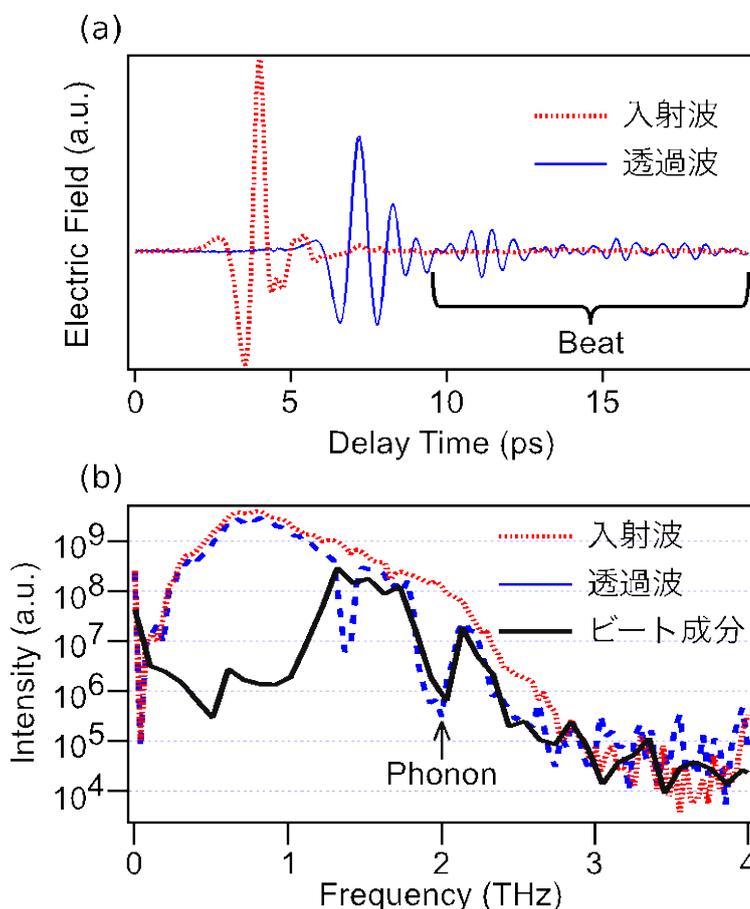


Fig. 1. (a) Input and transmitted pulse shape at 48K.  $E_{\text{THz}}$ // b axis. Sample is 1.2mm thick.

(b) Power spectra for input wave, transmitted wave and beating part.

## References

- [1] D. Frohlich, A. Kulik, and B. Uebbing, Physical Review Letters **67**, 2343(1991)
- [2] H.J.Bakker, S. Hunsche, and H. Kurz, Physical Review Letters **69**, 2823(1992)
- [3] 足立 安比古, 修士論文(2011)

# 高分子安定化ブルー相における光誘起 Slippery 界面形成と 駆動電圧低減効果

ソフトマター物理学研究室 加藤省吾

**Abstract** Polymer stabilized blue phase (PSBP) is widely noticed for the future display materials with fast electro-optic response. We design nano slippery interfaces coated on the polymer networks in the PSBP to reduce the driving voltage.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

高分子安定化ブルー相(PSBP)は、高速な応答を示す次世代の液晶材料として注目を集めているが、駆動電圧が高いために実用化に至っていない。一方、Slippery 界面と呼ばれる界面設計原理を用いて、界面における液晶分子の運動性を潤滑し、液晶表示素子の駆動電圧を低減化する試みがある

【1】。しかし、液晶表示素子におけるガラス界面の Slippery 化と異なり、PSBP において対象とする界面は、高分子安定化の過程でブルー相欠陥部に生成される、ナノスケールのポリマー柱と液晶（ブルー相）とのナノ界面である。そこで我々は、ブルー相を高分子安定化する過程において、光重合性アゾ化合物を欠陥部で共重合することで、アゾ化合物が欠陥部に局在した高分子安定化ブルー相(Azo-PSBP)を設計し、これを作成することに成功した【2】。Azo-PSBP に UV 光を照射すると、ナノ界面上で Cis 体へと光異性化したアゾ化合物が、ナノ界面近傍の液晶秩序を局所的に大きく低下させ、液晶とポリマー柱との界面に液晶相が融解した等方相が生成して、Slippery 界面の役割を果たす。

Fig.1 に透過光強度の電圧依存性を示す。インプレーン（水平電場：IPS）電極を用いることにより、電場印加で複屈折が誘起され、クロスニコル下で測定すると誘起複屈折に対応した透過光を生じる。UV 光(波長 365nm, 1mW/cm<sup>2</sup>)照射下(●印)で Slippery 界面が誘起された状態での透過光強度と UV 光非照射状態での透過光強度(■印)を比較した。

T<sub>c</sub> は等方相-ブルー相相転移温度であり、測定温度は T-T<sub>c</sub>= -8.4℃である。UV を照射した時の方が高い透過光強度が得られ、Slippery 界面の生成により、駆動電圧が低下したと考えられる。Fig.2 は階段波形電場(120V/10μm)に対する応答の波形である。UV 光非照射状態では、図から分かるように応答時間は数十マイクロ秒である。UV 光照射下で Slippery 界面が誘起された状態でもほぼ変化はなく数十マイクロ秒に保たれており、現在表示材料として一般的に使用されている液晶相であるネマチック相(数ミリ秒)と比較して高速な応答を示す。

このように我々はアゾ化合物を UV 光によってナノ界面に局在した Azo 化合物を Cis 体に光異性化させることにより、Azo-PSBP における高分子柱と液晶との間に、ナノスケールの Slippery 界面を誘起し、応答速度を変化させることなく PSBP の駆動電圧を低減させることに成功した。

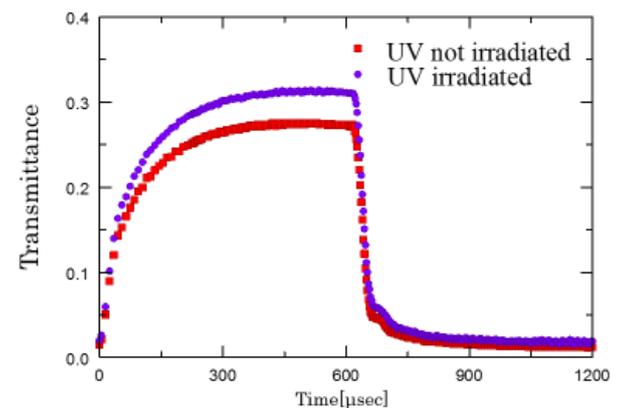
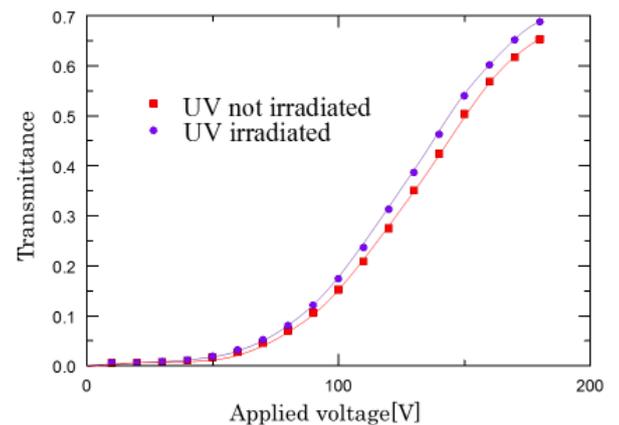


Fig.2 Electro-optical response curves

## References

- 【1】 山本潤、西山伊佐 日本液晶学会討論会 3a11 (2013)
- 【2】 加藤省吾ほか, 日本物理学会 19pBF-7 (2016)

# スメクチック液晶混合系における層構造の競合とソフトニング現象

ソフトマター物理学研究室 佐伯一帆

**Abstract** We studied the softening of elasticity appearing in the mixtures composed of a monomeric LC and a ‘twin’ LC containing two mesogenic units. We performed viscoelastic and XRD measurements for several mixtures, and found the softening occurs only in the systems having the frustration of the mutual molecular length.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

スメクチック相は一次元層状秩序を持つ液晶相であり、その層間隔や層圧縮弾性率（層の圧縮変形に関わる、いわゆるヤング率）は、層構造の起源や安定性と強い関係がある。ここで、一種類の分子からなる層構造の層間隔は分子長程度となるが、互いに分子長が大きく異なる二種類の液晶分子の混合系では、層構造に様々な特異性が現れる。先行研究ではある種のカイラル液晶分子と、その2つを化学的に結合したツイン分子との混合系を用い、分子長の差が正確に2倍となる混合系を設計して、(A)

「混合系の層間隔が、ツイン分子の濃度とともに連続的に増加する」ことを見出した。つまり混合系では、層間隔がいずれの分子

の分子長とも整合しない。さらに中間の濃度領域で、(B) 層圧縮弾性率に一桁以上もの異常なソフトニングが起こることも発見された[1]。そこで本研究では、(A) , (B) などの特異性が、分子長が大きく異なるモノマー・ツイン液晶分子混合系に普遍的に現れることを確かめるため、混合系の特徴として(i) 分子長比の正確性（ちょうど2倍）、(ii)メソゲン部位の同一性、(iii)カイラリティの3つの微視的特徴に着目し、複数のモノマー・ツイン混合系をデザインして、層圧縮弾性率およびX線回折装置による層間隔測定を行った。選んだ4種類の混合系の組成と特徴をFig.1に示す。また、測定された層圧縮弾性率および層間隔のツイン分子濃度依存性をそれぞれFig.2に示す。Mixture①～③では先行研究と同様に、ツイン分子濃度の増加に伴う層間隔の連続的な増加(A)と層圧縮弾性率の異常なソフトニング(B)が確認された。他方、Mixture④では、少なくとも50wt%の混合濃度まで層間隔はモノマー単体の間隔から殆ど変化せず層間隔の連続変化

(A) は起こらなかった。また同時に、層圧縮弾性率の測定からも、異常なソフトニング(B)も確認できなかった。以上のことから、互いの分子長が大きく異なるモノマー・ツイン混合系において、互いの分子長が競合した層構造が形成される(A)場合、(i)～(iii)のような液晶分子のマイクロな特徴に関係なく、極めて高い普遍性で層圧縮弾性率に大きなソフトニング(B)が発現することが確認された。

## References

[1] J. Yamamoto, I. Nishiyama, M. Inoue and H. Yokoyama, Nature, 437, 525 (2005)

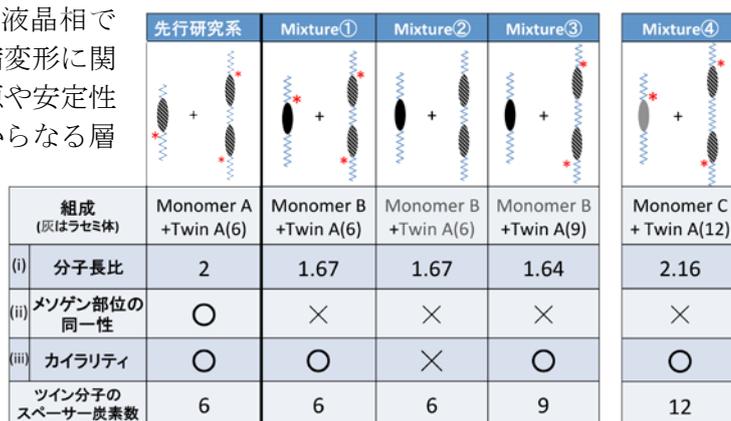


Fig. 1 各混合系の組成とその特徴（同じ色の楕円は同じ化学構造のメソゲンを表す）

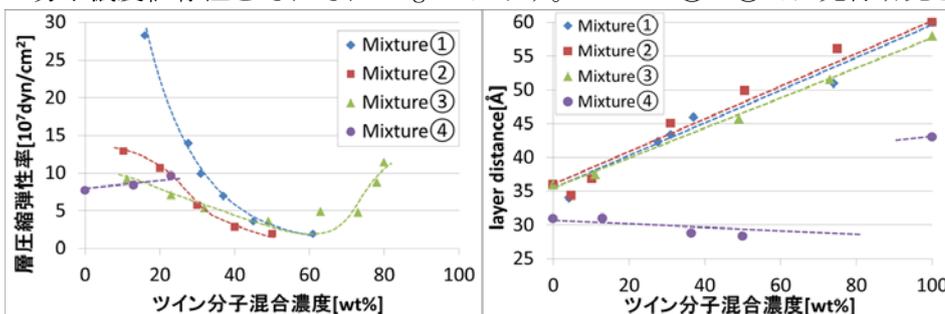


Fig. 2 各混合系の層圧縮弾性率(左)と層間隔(右)のツイン分子濃度依存性

# X線小角散乱とMSFT法を用いた 単一クラスターの3次元形状解析

不規則系物理学研究室 佐藤由比呂

**Abstract** Development of free electron laser (FEL) enable us to investigate morphology of the nano-object using small angle x-ray scattering (SAXS) technique. We implement multi-slice Fourier transformation (MSFT) method to calculate SAXS images of clusters, and examine the relation between morphologies of nano-object and SAXS images to understand experimental results.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

近年のX線自由電子レーザー(FEL)の発展により、単一のクラスターやナノ粒子、たんぱく質などの構造の、高強度X線パルスを用いたイメージング実験による測定が可能になった。X線小角散乱(SAXS)で得られる散乱像は、粒子の大きさや形状を反映し、これまでのクラスターを対象にした実験では、種々の多面体構造[1]や、非結晶を示唆する構造[2]などが報告されている。原理的には、SAXSで得られる散乱像は、3次元構造の射影像とFourier変換で結ばれる関係にあり、同一構造の粒子の高精度なデータを多数得られる場合には、位相回復などの手法を用いて3次元構造を回復する手法が開発されている。本研究で対象とするクラスターでは、試料集団中に多数の構造異性体が存在することが多く、既存の位相回復手法を適用することが困難である。我々は、構造モデルを用いたシミュレーションなどを用いることで、実験から得られる単一の散乱像から、クラスターの形状を推定する事を目的とする。このような手法は、pump-probe法を用いる時分割計測などで測定される、クラスターの形状変化や密度分布の変化を追跡するような研究に応用することができると期待される。

我々は、multi-slice Fourier transformation (MSFT)法[3]を導入し、粒子の3次元構造から散乱像を高速に計算する手法を実装した。MSFT法は、クラスターの存在する実空間をX線入射方向に垂直な平面に分割し、各平面で吸光の効果を取り入れ、逐一Fourier変換を行う手法であり、任意の波長と物質によるクラスターのX線小角散乱のイメージを高速に得ることができる。小角散乱によるイメージから実空間上のクラスター形状や密度分布を推定するために、種々の構造モデルを用いてX線小角散乱像を評価した。開発した手法を用いて、巨大Xeクラスター(粒子直径~300 nm)を試料とした単一クラスターの小角散乱イメージから、粒子形状を推定する事も試みた。

MSFT法によるXeクラスターのX線小角散乱イメージの、形状や波長による変化を、いくつかの既に表示されている形状について計算し、実験で得られたイメージと照らし合わせてクラスター形状を推定した。実験で得られた散乱像は、母体となる大きな球の表面に複数の小球が付着したhailstoneと呼ばれる形状であると推定された。hailstone構造のクラスターによるイメージを詳細に調べ、小球の大きさや数などを見積もった。

## References

- [1] I. Barke et al., Nat. Commun. **6**, 6187 (2015).
- [2] D. Rupp et al., J. Chem. Phys. **141**, 044306 (2014).
- [3] J. M. Cowley and A. F. Moodie, Acta Cryst. **10**, 609 (1957).

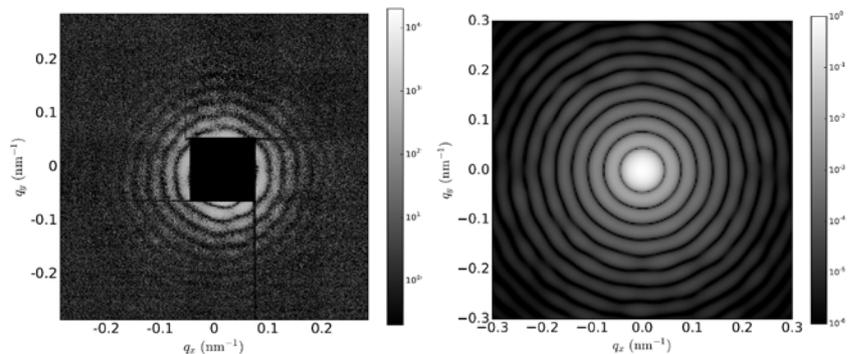


Fig. 1. Experimental SAXS image of Xe cluster (left), and SAXS image simulated with MSFT calculation (right).

# 高純度ダイヤモンドの不純物定量による 電子正孔系の散乱機構の研究

光物性研究室 下村 尊明

**Abstract** It has been known that dominant impurities in diamond are nitrogen and boron. These impurities in diamond affect scattering and relaxation dynamics of the photoexcited electron-hole system. There are several methods, such as infrared absorption and secondary-ion mass spectroscopy to quantify impurities in diamond at parts-per-million (ppm) levels. However, methods of evaluating impurities at parts-per-billion (ppb) levels are not established yet. In this study, we have performed electron-spin-resonance (ESR) measurements for nitrogen and photoluminescence spectroscopy for boron in order to determine concentrations below the ppm level. We also quantitatively evaluate scattering rates of carriers by considering interactions with neutral or ionized impurities, excitons, and isotopic disorder.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

ダイヤモンドは、近年高純度な試料が作製可能になり、光励起によって生成される電子正孔系の研究舞台として注目されている。ダイヤモンド中の不純物は電子正孔系の散乱に大きな影響を及ぼすが[1]、ppb レベルの低濃度な領域において不純物の定量法は確立されていない。そこで本研究では、極めて高純度なダイヤモンドに対し、赤外分光法、電子スピン共鳴法、及び発光分光法を用いて、主たる不純物である孤立窒素中心（炭素原子が窒素原子に置換された欠陥中心）とホウ素不純物の定量を行なった。また、高分解吸収スペクトルから励起光の侵入長を決定し、励起子系の密度、及び温度を見積もった。これらを元に、ダイヤモンド内部の不純物による自由キャリアの散乱[1]の起源を定量的に議論した。

磁場中では孤立窒素中心がもつ不対電子の準位はゼーマン分裂し、そのエネルギー差に対応するマイクロ波が吸収される。この電子スピン共鳴によるマイクロ波吸収量を試料ごとに比較することで孤立窒素濃度の相対濃度を得ることができる。ここで、予め赤外分光法により定量した高濃度な試料を標準試料として用いることで、最終的に絶対濃度を決定した。一方、ホウ素不純物は結晶中の励起子をとらえ、束縛励起子を形成する。自由励起子と束縛励起子の発光強度比とホウ素濃度には100 Kにて線形の相関があることが知られており[2]、この方法を用いて定量を行なった。以上の測定から、今までの検出限界を超えた0.1 ppbレベルの濃度領域まで窒素、ホウ素を定量することができた。

図に、本実験で決定した不純物濃度から計算した、ダイヤモンド中の自由キャリア（軽い正孔、重い正孔、電子）に対する中性不純物散乱 (ni)、イオン化不純物散乱 (ii)、励起子—キャリア散乱 (ex) [3]、 $^{13}\text{C}$ による同位体散乱 (iso) [4]のレートと、先行研究の実験値を示す。実験値との比較から、中性不純物散乱以外に、励起子と同位体による寄与が無視できないことがわかった。また、イオン化不純物は光中性化により影響が小さいことも示唆された。

## References

- [1] I. Akimoto, N. Naka, and N. Tokuda, *Diam. Relat. Mater.* **63** (2016) 38.
- [2] J. Barjon, et al., *Phys. Rev. B* **83** (2011) 073201.
- [3] S. G. Elkomoss and G. Munsch, *J. Phys. Chem. Solids* **38** (1977) 557.
- [4] S. Fahy and E. P. O'Reilly, *Appl. Phys. Lett.* **83** (2003) 3731.

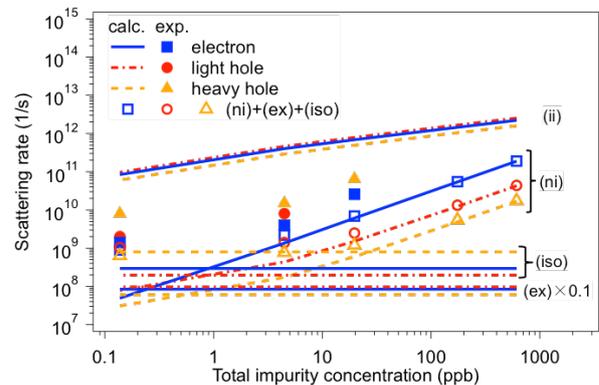


Figure: Impurity concentration dependence of the calculated (lines) and measured (solid symbols, [1]) scattering rates. (ni), (ii), (ex), and (iso) indicates scattering by neutral impurities, ionized impurities, excitons and isotopic disorder by  $^{13}\text{C}$ , respectively. Open symbols represent the sum of (ni), (ex), and (iso).

# 強相関電子系で発現する トポロジカル超伝導についての理論研究

凝縮系理論グループ 大同暁人

**Abstract** Realizing topological superconductivity (TSC) in materials is one of the most important issues in modern condensed matter physics [1]. In spite of extensive research, topological superconductivity in nature has not been established so far. Therefore, realistic schemes for realizing TSC are desired. We propose an experimentally feasible scenario for realizing TSC based on familiar spin-singlet superconductors [2, 3]. Nodal noncentrosymmetric 2D spin-singlet superconductors are shown to become gapful TSC under vertical Zeeman field. Thin film of cuprate high temperature superconductors are good candidates. Extension toward gapless TSC under tilted Zeeman field [4] and 3D Weyl superconductivity are also discussed.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

トポロジカル超伝導は、端状態や渦芯状態として Majoran フェルミオンを持つことで知られており、理論・実験の双方から注目を集めている物質相の一つである [1]。Majorana フェルミオンは量子計算の構成要素として期待されており、現実的なトポロジカル超伝導体の探索が喫緊の課題である。

本研究では、トポロジカル超伝導を実現する一般的なシナリオを提案する [2, 3]。空間反転対称性の破れた系において、ノードのある2次元のスピンシングレット超伝導体は垂直磁場でフルギャップのトポロジカル超伝導になることが明らかになった。このトポロジカル超伝導相は、銅酸化物高温超伝導体の薄膜や重い電子系超伝導体  $\text{CeCoIn}_5$  の薄膜において実現されていることが期待される。先行研究によって提案されたトポロジカル超伝導を実現するシナリオに比べて、我々の方法は無限小の磁場によってトポロジカル超伝導を実現することができ、かつ化学ポテンシャルの微調節を必要としないという長所がある。これらのことは、トポロジカル超伝導を物質中で実現する上で有利に働くと考えられる。

また、上記のシナリオを傾斜磁場中に拡張して得られる、両端のエッジで同方向に伝搬する Majorana 端状態 [4] や、3次元に拡張して得られる Weyl 超伝導相についても議論する。Weyl 超伝導相の候補物質としては空間反転対称性の破れた3次元超伝導体として知られる  $\text{CePt}_3\text{Si}$ ,  $\text{CeRhSi}_3$ ,  $\text{CeIrSi}_3$  がある。

## References

- [1] X.-L. Qi and S.-C. Zhang, *Rev. Mod. Phys.* **83**, 1057 (2011)
- [2] T. Yoshida and Y. Yanase, *Phys. Rev. B*, **93**, 054504 (2016)
- [3] A. Daido and Y. Yanase, *Phys. Rev. B*, **94**, 054519 (2016)
- [4] A. Daido and Y. Yanase, arXiv: 1611.09492

# UPd<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>における $H_{c2}$ 近傍の超伝導状態

## Superconducting state near $H_{c2}$ in UPd<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>

固体量子物性研究室 高木亮一

Quantum Material Laboratory Ryoichi Takaki

**Abstract** We have performed <sup>27</sup>Al-NMR study on the U-based superconductor UPd<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> to investigate the superconducting properties near the upper critical field  $H_{c2}(0)$ . We found that the line width of the NMR spectrum becomes broadened above 2 T. We discuss the relationship between the spectrum broadening and the FFLO state.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

一般的に第二種超伝導体に磁場を印加すると、磁束が超伝導体内部に侵入し、上部臨界磁場  $H_{c2}$  において超伝導状態が壊される。通常この相転移は二次相転移であるが、パウリ常磁性の効果が大きな超伝導体においては、 $H_{c2}(0)$ 近傍の超伝導転移が一次相転移になることが知られている。このような場合には、超伝導ギャップが空間変調を受けた FFLO (Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov)状態が実現する可能性が指摘され[1,2]、近年異方的超伝導体 CeCoIn<sub>5</sub>や有機物超伝導体  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu(NCS)<sub>2</sub> において盛んに研究がなれされている。

我々はウラン系超伝導体 UPd<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> に着目し、FFLO 状態の探索を行っている。この超伝導体は 14 K で反強磁性転移した後、2 K で異方的超伝導状態に転移する物質であり[3]、中性子散乱実験から、超伝導と反強磁性秩序が共存していることが指摘されている[4]。また、磁歪の研究から低温高磁場領域の超伝導転移が一次相転移になることが観測され、FFLO 状態の可能性が既に示唆されているが[5]、確証には至っていない。

今回、UPd<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> 純良単結晶試料を用いて<sup>27</sup>Al-NMRを行った。図1に示すように  $T_N = 14$  K にて反強磁性転移に伴いスペクトルの線幅が増大し、超伝導転移でさらに線幅が増大する。図2に超伝導状態である  $T = 0.3$  K と、超伝導転移以上の温度で測定したスペクトルの半値全幅(FWHM)の磁場依存性を示す。超伝導状態における線幅の増大は低磁場ではほぼ一定であるが、2 T 以上の高磁場では線幅が増大している。超伝導状態における線幅の増大の起源として一般に超伝導反磁性の効果があるが、これは磁場を増大させると抑制されるため、高磁場における振る舞いを説明できない。この高磁場領域のスペクトルの線幅の増大について FFLO 状態との関連を議論する。

### References

- [1] P. Fulde *et al.*, Phys. Rev. **135**, A550 (1965).
- [2] A. I. Larkin *et al.*, Sov. Phys. JETP, **20**, 762 (1965).
- [3] C. Geibel *et al.*, Physica C 185-189, 2651 (1991).
- [4] N. Metoki *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **66**, 2560 (1997).
- [5] K. Gloos *et al.*, Phys. Rev. Lett. **70**, 501 (1993).

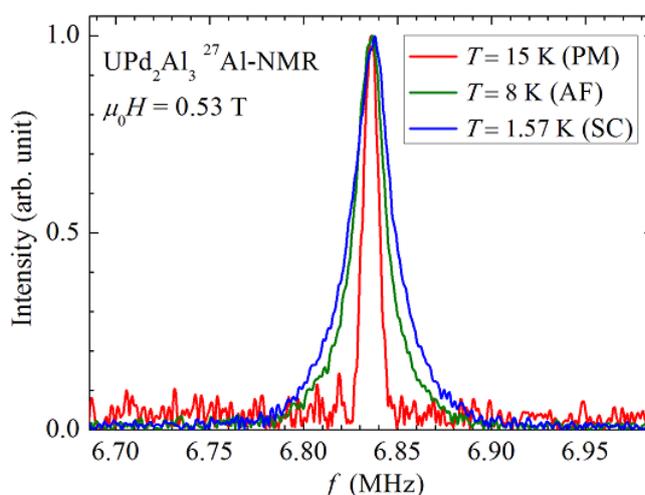


Fig. 1. <sup>27</sup>Al-NMR spectra of UPd<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> at 15 K, 8 K and 1.57 K under  $\mu_0 H = 0.53$  T.

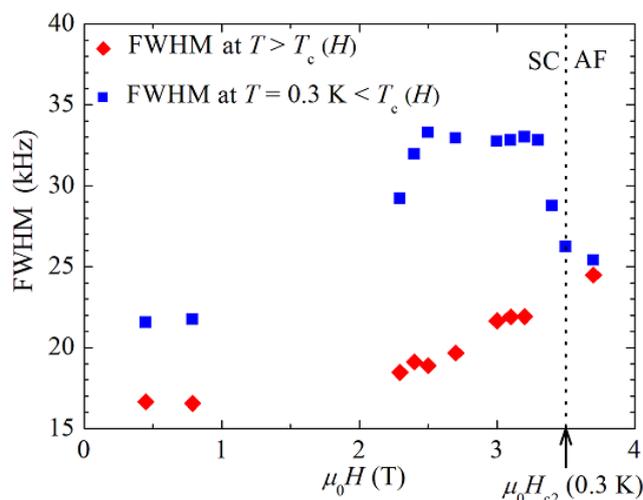


Fig. 2.  $H$  dependence of the full width at half maximum (FWHM) below and above  $T_c$ .  $H_{c2}$  at 0.3 K is shown with the dotted line.

# 格子ボルツマン法による粘弾性流体の円柱後流の考察

流体物理学研究室 陳運開

**Abstract** Negative wake is an intrinsic phenomenon of non-Newtonian fluids, which occurs in a flow past a sphere or cylinder. We numerically study this unresolved problem with a lattice Boltzmann method extended to viscoelastic fluids. Our results are compared with previous numerical researches to better understand the phenomenon. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

ナビエ・ストークス方程式に従うニュートン流体では剪断応力が速度勾配に比例する。この関係が成立しない非ニュートン流体は、ケチャップなどの食品を始めとして、日常的によく接する流体である。当然、非ニュートン流体はニュートン流体と異なる特有の現象を示す。本研究の対象は粘弾性流体特有の現象として知られる negative wake である。

この後流現象は、高分子溶液中を緩やかに沈降する単一剛体球の実験で発見された [1]。具体的には Fig. 1 の破線のように、後流の速度の向きが球の速度と逆になることが観察された (ニュートン流体中では後流と球の速度は同じ向きになる)。その後、文献 [2] で高分子溶液中を浮力で緩やかに上昇する小さい単一気泡の後流でも同じ現象が観察され、negative wake と命名された。ニュートン流体の球あるいは円柱の周りの低レイノルズ数流れとは異なり、negative wake の発生条件や機構は判明していない。

この現象を理解するための一つのアプローチは数値計算である。高分子溶液を粘弾性流体として扱い、様々な粘弾性モデルを用いて球や円柱 (2次元の円) 後流を数値シミュレーションして考察する先行研究がある。文献 [3] では、粘弾性モデルに FENE-CR と上対流 Maxwell (UCM) モデルを使った。文献 [4] では線形 Maxwell モデルを用いた。ともに negative wake は数値的に観察されている。しかし、線形粘弾性モデルである UCM では negative wake が生じないとする [3] に対して、[4] では生じるなど、先行研究の結果は整合的でない。この非整合の原因として、三次元 (軸対称) [3] と二次元 [4] の違いが考えられる。

本研究の目的は、複数の粘弾性モデルを用いた数値シミュレーションによって、negative wake についての上記の結果を追試し、発生条件を整理して形成機構を理解することである。出発点として、理論的に最も単純な設定 (空間二次元チャンネルの円の後流、線形粘弾性モデル) をした [4] の設定をとり、徐々に複雑にする。

本研究では計算スキームとして [4] と同様に格子ボルツマン法 (LBM) を用いる。ただし、[4] と同一の LBM ではなく、[5] で提案されたハイブリッド LBM (速度場を LBM で解き、粘弾性応力場の方程式を差分法で解く) を使用した。また、円柱の入れ方は [6] の埋込境界法を使った。粘弾性モデルは、線形 Maxwell、Oldroyd-B モデルを使った。文献 [4] の結果に反して、本研究では線形 Maxwell、Oldroyd-B モデルの両方で negative wake が観察されなかった。この結果は [3] の結論と一致する。この結果について非線形の粘弾性モデル FENE-CR を用いた計算をすることで、比較検討を行う。

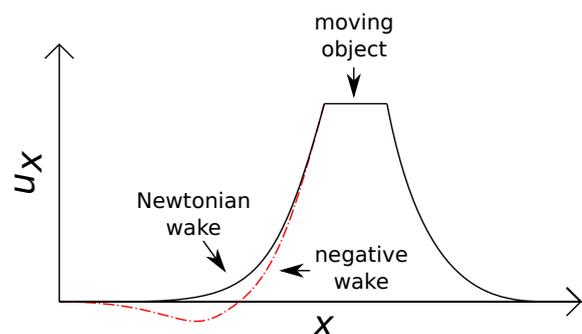


Fig.1 A diagram of negative wake, which shows the velocity profile along the center line,  $u_x(x, y = 0)$ , in the laboratory coordinate system. The wake velocity is opposite to the velocity of the moving object when the negative wake occurs.

## References

- [1] D. Sigli, M. Coutanceau, J. Non. Newton Fluid Mech., **2**, 1-21 (1977)
- [2] O. Hassager, Nature, **279**, 402-403 (1979)
- [3] J.V. Satrape, M.J. Crochet, J. Non. Newton Fluid Mech., **55**, 91-111 (1994)
- [4] X. Frank, Z. Li, Phys. Rev. E, **74**, 056307 (2006)
- [5] J. Su, J. Ouyang, X. Wang, B. Yang, Phys. Rev. E, **88**, 053304 (2013)
- [6] J. Wu, C. Shu, J. Comp. Phys., **228**, 1963-1979 (2009)

# 熱伝導率測定による量子スピン液体 $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 中の 創発電気単極子及び創発フォトンの観測

量子凝縮物性研究室

寺澤大樹

**Abstract** Recently, it has attracted great attention how the spin-ice ground state is altered by the quantum fluctuations. To clarify this issue, we have measured the thermal conductivity of  $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ . We provide evidence of emergent electric monopoles and photon in addition to magnetic monopoles reported by the previous study.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

近年スピン系において、量子揺らぎの効果により絶対零度でもスピンの長距離秩序を示さない「量子スピン液体」(Quantum Spin Liquid : QSL)が大きく注目を集めている。QSLの基底状態は量子力学的に強くエンタングルメントしており、その励起状態には、スピノンのような分化した準粒子など、非常にエキゾチックな素励起が現れると期待されている[1]。2次元以上の系では、三角格子やカゴメ格子構造のような幾何学的フラストレーションが長距離秩序を抑制することにより、QSLを安定化することができると考えられており、これまで理論、実験両面から精力的に研究がなされている。しかしながら QSL中の素励起についてあまり分かっていないため、QSLの基底状態の性質は未だほとんど理解されていないままである。

3次元系における幾何学的フラストレーション系の一つとして、頂点共有した正四面体によって構成されるパイロクロア希土類酸化物が挙げられる。これらの物質中では結晶場によりスピンの量子化軸が正四面体の重心方向に限定され、各スピンは弱く強磁性的に結合する。 $\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ や $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ のようなイジング性の強い物質では、基底状態において各正四面体上のスピンはアイスルールに従い、二つが内向き、残る二つが外向きの 2in-2out 構造を形成する。2in-2outの取り方は全部で6通り存在するため、基底状態が巨視的に縮退し磁気モーメントが凍結したスピンアイス状態が実現する。スピンアイスからの素励起は、局所容易磁化軸方向のスピン反転が分化して出来た磁気単極子( $M$ -particle)励起であり、熱拡散的に伝播することが知られている[2]。

一方、磁気モーメントが小さい $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ では、強い量子揺らぎの効果により巨視的な縮退が解かれ、QSLが実現すると考えられている。実際この系では比熱測定や中性子散乱実験[3]により、極低温までスピンの凍結しないことが確認されている。さらにこの量子揺らぎによって QSL 中では  $M$ -particle が分散を持ち、コヒーレントに伝搬することが報告されている[4]。また有効的なスピン系のダイナミクスを量子電磁気学と対応させることによって、局所容易磁化軸に垂直な方向のスピンの量子揺らぎに起因する電気単極子( $E$ -particle)や、 $M$ -particle と  $E$ -particle を媒介するゲージ場の揺らぎである emergent photon ( $\nu$ -particle)励起が発生すると理論的に提唱されている[5]。 $E$ -particle、 $\nu$ -particle に関しては未だ実験的な研究結果は報告されておらず、これらを調べることは量子スピン液体の理解を進めるうえで非常に重要なものである。

このような背景から、本研究では $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ の素励起の性質を調べるために、低エネルギーの準粒子励起に敏感なプローブである熱伝導率測定( $\mathbf{Q} // [1,-1,0]$ ,  $\mathbf{B} // [1,1,1]$ )を行った。その結果熱伝導率の温度依存性が特徴的な振舞いをする三つの温度領域があることが分かった。我々は各温度領域での磁場依存性も踏まえ、三種類の準粒子、 $M$ -particle、 $E$ -particle、 $\nu$ -particle をそれぞれ観測したと考えている。本講演ではこれらの結果について詳細に議論する予定である。

## References

- [1] L. Balents, Nature **464**, 199 (2010).
- [2] C. Castelnovo *et al.*, Nature **451**, 42 (2008).
- [3] K. Kimura *et al.*, Nat. Commun. **4**, 1934 (2013).
- [4] Y. Tokiwa *et al.*, Nat. Commun. **7**, 10807 (2016).
- [5] M. Hermele, M. P. A. Fisher and L. Balents, Phys. Rev. B **69**, 064404 (2004).

# CeCoIn<sub>5</sub>/CeRhIn<sub>5</sub> ハイブリッド近藤超格子における 超強結合超伝導状態

量子凝縮物性研究室 成塚政裕

**Abstract** We fabricate heavy-fermion superlattices with alternating layers of *d*-wave superconductor CeCoIn<sub>5</sub> and spin-density-wave (SDW) CeRhIn<sub>5</sub> and investigate pressure effect on them. At low pressure, superconductivity coexists with SDW.  $H_{c2}/T_c$  is strikingly enhanced with  $P$  near SDW quantum-critical point, implying quantum critical fluctuations in neighboring layers lead to extremely strong-coupling superconductivity.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

重い電子系化合物は化学置換・圧力・磁場などにより基底状態を容易に変えることができるため、量子臨界現象の研究が最も盛んに行われている。なかでも Ce 系化合物では、量子臨界点(Quantum critical point, QCP)近傍での反強磁性と超伝導の共存といった興味深い現象が観測されている[1]。近年、我々のグループでは、分子線エピタキシー法により CeTIn<sub>5</sub> 系( $T = \text{Co, Rh}$ )近藤超格子の作製に成功し、QCP の次元性制御や超伝導の 2 次元閉じ込めにより、バルクでは実現できなかったエキゾチックな電子状態を報告してきた[2]。

本研究では、超伝導と磁性の界面を介した相互作用を調べるために、*d* 波超伝導体の CeCoIn<sub>5</sub> ( $T_c = 2.3$  K) と常圧でスピン密度波 (SDW) 状態にある CeRhIn<sub>5</sub> (SDW 温度  $T_{\text{SDW}} = 3.5$  K) を原子層単位で繰り返し積層成長させた CeCoIn<sub>5</sub>/CeRhIn<sub>5</sub> 超格子 (ハイブリッド超格子) を作製した (Fig. 1)。CeRhIn<sub>5</sub> のバルクや単層膜では、 $\sim 2$  GPa の圧力下で  $T_{\text{SDW}}$  がゼロになる SDW の QCP が現れ、量子ゆらぎの効果により、通常のフェルミ流体的振る舞いから大きく逸脱した様々な異常な物性が報告されている。我々は、超格子に圧力を印加することで、CeRhIn<sub>5</sub> 層を量子臨界状態に持って行くことに成功した。

電気抵抗の測定から、低圧では超格子において超伝導と SDW が共存していることがわかった。圧力を増加していくと、 $T_c$  の変化は小さいものの、 $T_{\text{SDW}}$  が絶対零度に向かう臨界圧力 ( $\sim 2.1$  GPa) で  $H_{c2}$  が急激に増大する振舞いが観測された (Fig. 2)。この結果は、CeRhIn<sub>5</sub> の SDW-QCP 近傍の圧力下では、SDW 層の量子臨界揺らぎが隣接する CeCoIn<sub>5</sub> の *d* 波超伝導に非常に強く影響を与え、超強結合超伝導状態が実現している可能性を示唆するものである。

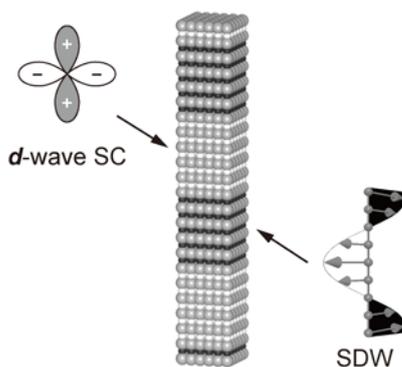


Fig. 1. Schematic picture of a hybrid superlattice with alternating layers of CeCoIn<sub>5</sub> and CeRhIn<sub>5</sub>.

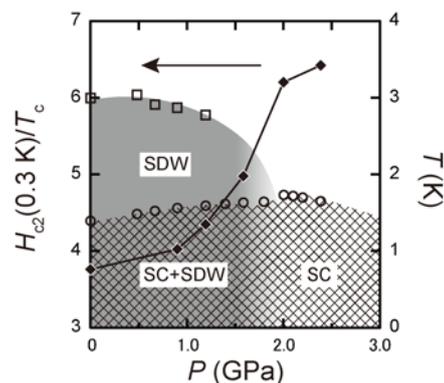


Fig. 2.  $H_{c2}/T_c$  vs  $P$  and  $T$ - $P$  phase diagram.

## References

- [1] J. D. Thompson *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn., **81**, 011002 (2012).
- [2] M. Shimozawa *et al.*, Rep. Prog. Phys., **79**, 074503 (2016).

# 超流動 $^3\text{He}$ のドメイン構造の安定性 についての研究

低温物理学研究室 西岡敬史

**Abstract** We observed spontaneous change of domain structure in a slab of superfluid  $^3\text{He-A}$  by NMR and MRI measurement when temperature approached near critical temperature.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

超流動  $^3\text{He}$  はトリプレット P 波クーパー対により形成されるため多数の内部自由度を持っている。その中でも、超流動  $^3\text{He-A}$  相はスピン  $\mathbf{S}$  に直交する向きに定義される  $\mathbf{d}$ -ベクトルとクーパー対の軌道角運動量の向きを示す  $\mathbf{l}$ -ベクトルの二つのベクトルで決まる状態である。また、 $\mathbf{l}$ -ベクトルの方向にエネルギーギャップが消える非等方的な構造をしている。そのため壁がある場合は、 $\mathbf{l}$ -ベクトルは壁に対して垂直な方向を向く拘束条件が課せられる。一方、任意の空間に対してそれらのベクトルがどの方向に向くかは、dipole エネルギー、磁気エネルギー、勾配エネルギーといった各種の自由エネルギーの和が各所で最小になるように決まり、こうした内部自由度の成す空間構造を **Texture** と呼ぶ。この **Texture** の中には、エネルギーの縮退した 2 種の安定状態に挟まれた局所的に自由エネルギーの高い準安定状態が存在する場合がある。このような準安定状態から安定状態の **Texture** へと変化するには、大きなエネルギー障壁が存在するからである。このような準安定状態のうち平面状の構造を持つものは **domain wall** と呼ばれている。 $^3\text{He-A}$  相の **domain wall** としては、Maki らにより提案された **composite soliton** がよく知られている[1]。

先行研究で岡本ら[2]は、 $100\mu\text{m}$  間隔の平行平板中の超流動  $^3\text{He-A}$  相において、カイラリティーのそろった均一 **Texture** の中に出現した **domain wall** を可視化することに成功し、これが「**Dipole-Locked Soliton**」であり、カイラリティーの異なるドメイン間に挟まれた **domain wall** であることを示した。この **domain wall** は臨界温度より低温の  $T/T_c=0.833$  (2.0 mK) 付近では安定に存在する。しかし、臨界温度直下まで温度を上げて数時間保ち、温度を下げてから MRI 測定を行うと、この **domain wall** が移動または消滅する現象が見られた。**Texture** を決める各種の自由エネルギーの  $T_c$  近傍における温度依存性は全て等しいので、温度の上げ下げによる **domain** 構造の変化には他の要因を必要とする。**domain** 構造の変化を引き起こす原因としては、サンプルセル内の温度差や、他の要因に起因する超流動の流れ、或いは熱揺らぎの効果等様々なものが考えられる。本研究では、臨界温度付近で、温度を精密に変えて NMR または MRI 測定を行い、また、サンプルセルの一部に熱を入れ意図的に流れを作りながら同様の測定をすることで、**domain** 構造の変化の手がかりを探った。

## Reference

- [1] K. Maki and P. Kumar, Phys. Rev. Lett. 38, 557 (1977).
- [2] 岡本耀平 修士論文 京都大学 大学院理学研究科(2016).

# 平行磁場下の層状超伝導体の渦格子構造転移

凝縮系理論グループ 橋本和樹

**Abstract** Recent experiments on d-wave superconductors with a uniaxial layered structure have revealed their properties in a magnetic field. Motivated by them, we studied Josephson vortex states of d-wave superconductors. In particular, we consider how the relative orientation between the magnetic field and the gap nodes affects the stability of the vortex lattice structure.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

磁場下での超伝導は多彩な物理現象を示す。第二種超伝導体は低磁場下では渦糸格子が基底状態となり、この渦糸格子構造に起因する超伝導現象をもつ。特に、層状超伝導において面内に平行に磁場をかけた場合、層と層の間にジョセフソン渦が生じる。ジョセフソン渦の基底状態は、層間の距離とコヒーレンス長の異方性を含めて定義された磁場の値によって、著しく異なることが理論的に知られている[1][2]。具体的には、層状効果に寄与する閾値周辺領域の整合的な磁場において pinned 固体が基底状態になり、さらに整合的な磁場を含めた広い範囲において rotated 固体と呼ばれる、層状構造に対して線対称でない渦格子構造が基底状態として現れる。

渦糸格子構造に影響する別の要因として、フェルミ速度と超伝導ギャップの異方性があげられる。特に、CeCoIn<sub>5</sub>を代表とする準2次元的d波対状態を持つ重い電子系超伝導体は、フェルミ面上で超伝導ギャップのノードが現れる異方的な電子対を組み、c軸に平行に磁場をかけた場合では三角格子から四角格子の相が現れることが知られている。一方で、層状構造が無視できる近似内でab面内に磁場をかけた場合では、超伝導ギャップのノード方向と磁場の方向によって渦糸格子の構造転移が理論的に示唆されている[3]。

上記の層状構造とd波対称性の効果に加えて、パウリ常磁性効果も渦構造に影響があると考えられる。実際、d波対称性と層状構造を持つ有機超伝導体の多くでは層に平行に磁場を印加すると高磁場で常磁性対破壊によりFFLO状態が現れると期待されている。この高磁場での渦糸状態の記述には高次のランダウ準位が必要となる[4]。

こうして層状構造が明確な有機超伝導体での平行磁場下における渦構造を考えるには、層状構造を持つ系に加えてd波対称性とパウリ常磁性対破壊の効果を考慮することが重要である[5]。

このような背景の下、今研究ではPauli常磁性対破壊効果を考慮して微視的に導出した層状超伝導体のGL自由エネルギーに基づいて、層に平行な磁場とギャップのノードの方向との相対的方位にジョセフソン渦糸格子構造がどのように依存するのかを平均場近似での範囲で調べた。

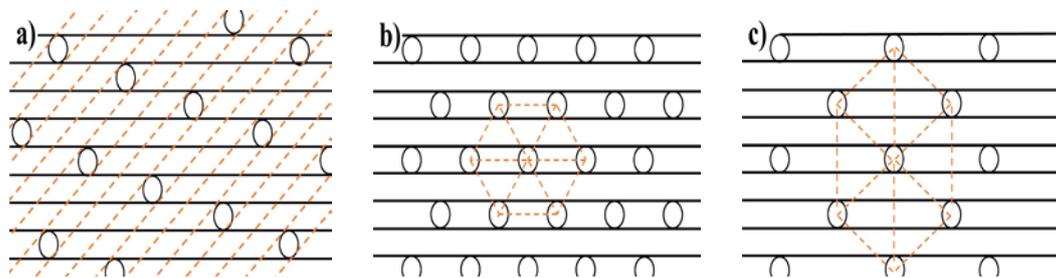


Fig. a) Rotated solid described in the plane, where horizontal lines denote the superconducting layers, and the open circles indicate the “core” of Josephson vortices. b), c) Possible stable vortex lattice configurations in which  $H \parallel ab$  or  $H \perp c$ .

## References

- [1] R. Ikeda et al., J. Phys. Soc. Jpn. 68, pp. 599-612 (1999)
- [2] R. Ikeda, J. Phys. Soc. Jpn. 71, pp. 587-593 (2002); Y. Nonomura et al., Phys. Rev. B 74, 024504 (2006).
- [3] M. Hiragi et al., J. Phys. Soc. Jpn. 79, 094709 (2010)
- [4] K. Yang et al., Phys. Rev. B 70, 094512(2004); N. Hiasa et al., Phys. Rev. B 80, 014501(2009)
- [5] S. Yasuzuka et al., J. Phys. Soc. Jpn. 82, 064716 (2013)

# 反強誘電性液晶・強誘電性液晶競合系における電気光学応答ダイナミクス

ソフトマター物理学研究室 林 来美

**Abstract** In a binary system of specific chiral molecules, an intermediate phase appears between anticlinic  $\text{SmCA}^*$  and synclinc  $\text{SmC}^*$  in some concentration range, which seems to be caused by their competition. We measured their electro-optical response, and discussed the relation between threshold of field induced  $\text{SmCA}^*$ - $\text{SmC}^*$  transition and the phase behavior.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

一次元層構造を持つキラルスメクチック液晶には、らせん構造を持ちつつ分子長軸が層法線からほぼ一方向に傾く (synclinc) 強誘電  $\text{SmC}^*$  相と隣接層でほぼ逆向きに傾く (anticlinic) 反強誘電  $\text{SmCA}^*$  相がある。一般に、この2相が競合する系ではその間に副次相とよばれる温度範囲の狭い液晶相が複数出現することが多い。だが MC881-MC452 混合系では Fig. 1 のように、MC452 のある濃度 (臨界濃度  $\phi_c \sim 58\text{wt}\%$ ) で  $\text{SmC}^*$ - $\text{SmCA}^*$  相転移線が温度軸に対してほぼ平行になる [1]。この系では、 $\phi_c$  付近で  $\text{SmC}^*$  と  $\text{SmCA}^*$  が競合し、その間に隣接層間の傾き相関が弱く傾き秩序がランダムな中間状態の存在が議論されている。本研究では、 $\phi_c$  に近い濃度や  $\text{SmC}^*$  から  $\text{SmCA}^*$  への直接転移を示す濃度での階段波形印加時の透過率の時間変化 (電気光学応答) を測定した。そして  $\text{SmCA}^*$  相が  $\text{SmC}^*$  相に電場誘起相転移するしきい値 ( $\text{SmCA}^*$  相の安定性を表す) を求め、電場挙動と出現する中間状態との相関を考察した。

Fig. 2 は、 $\phi=57.2\text{wt}\%$  の代表的な温度における  $\arcsin(\sqrt{I})$  の電場依存性である。透過光強度  $I$  は複屈折に対し  $\sin^2$  の形で増加し、複屈折は自発分極と結合している電場に比例する。 $\text{SmCA}^*$  相から自発分極の有する  $\text{SmC}^*$  相への電場誘起相転移で複屈折が増加し、 $\arcsin(\sqrt{I})$  は電場に比例する。それぞれの温度において点線で示すような2本の直線でグラフをフィッティングし、直線の交点を電場誘起相転移のしきい値とした。 $\text{SmCA}^*$  相である  $50^\circ\text{C}$  と  $66^\circ\text{C}$  では有限のしきい値が見られ、より  $\text{SmC}^*$  相に近い  $66^\circ\text{C}$  のしきい値の方が小さい。また、 $80^\circ\text{C}$  は  $\text{SmC}^*$  相なので、しきい値がゼロとなる。Fig. 2 のように各濃度でのしきい値の温度依存性を求めた結果が Fig. 3 である。インセットは  $\phi=57.2\text{wt}\%$  のしきい値を拡大したものである。点線は偏光顕微鏡観察によって得られた  $\text{SmCA}^*$  相と  $\text{SmC}^*$  相の間の転移温度を示している。臨界濃度に近い  $\phi=57.2\text{wt}\%$  のしきい値は  $\text{SmC}^*$  から  $\text{SmCA}^*$  への直接転移を示す  $\phi=40.0\text{wt}\%$  と比較して小さい。このことは、 $\phi_c$  に近い濃度の系では隣接層間の傾き相関が弱く、強誘電秩序と反強誘電秩序のエネルギー差が小さいため、低温側の  $\text{SmCA}^*$  相に影響し、しきい値が低下したのではないかと考えられる。また、転移温度付近のしきい値に着目すると、 $\phi=40.0\text{wt}\%$  では  $\text{SmCA}^*$  相のしきい値は有限の値となっているが、 $\phi=57.2\text{wt}\%$  では  $\text{SmC}^*$  相に転移する数°C手前で連続的にしきい値がゼロになっており、中間状態の存在が示唆される。また、この中間状態は  $\phi_c$  に近い濃度の  $\text{SmCA}^*$  相におけるしきい値の大きな低下に関係している可能性がある。

## Reference

[1] K. L. Sandhya *et al.* *Europhys. Lett.* 90, 56005 (2010).

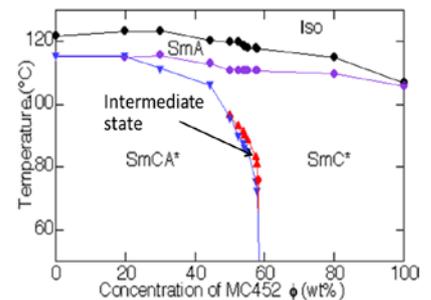


Fig. 1. The global temperature-concentration phase diagram for a binary-mixture system of MC882 and MC452 [1].

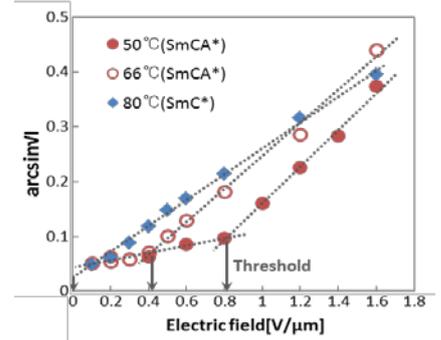


Fig. 2. Electric field dependence of transmittance in 57.2 wt.%.

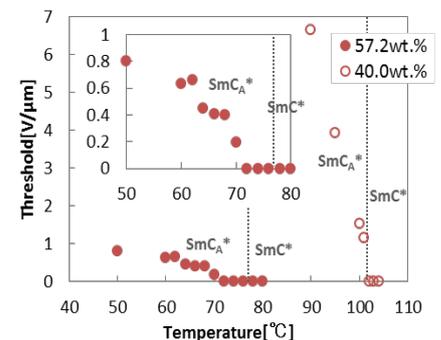


Fig. 3. Temperature dependence of threshold at various MC452 concentrations.

# アルカリ金属液体の放射光コンプトン散乱測定

不規則系物理学研究室 林浩之

**Abstract** We carried out X-ray Compton scattering measurements of liquid alkali metals (Na, K, and Rb) using synchrotron radiation. The experimental results indicate that Fermi momenta are well described with the electron gas model and that the effect of the interactions among constituents increases as the densities of the liquids decrease.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

気液共存線に沿って金属液体の密度を連続的に減少させると、臨界点近傍において金属 - 非金属転移が起こり絶縁体へと転移することが知られている。中でもアルカリ金属は融点近傍において電子ガスモデルにより良く記述されるが、密度減少に伴い電気伝導度や帯磁率に電子ガスモデルとのずれが生じ、粒子間相互作用の影響が増大することが明らかになっている[1]。

我々はこの低密度アルカリ金属流体の電子状態を明らかにするために、主に融点近傍から超臨界状態までの Rb や臨界密度の 2.5 倍程度の密度までの Na を対象として放射光コンプトン散乱実験を行ってきた。この測定では電子の運動量分布の散乱ベクトル方向への射影、コンプトンプロファイル(CP)を直接測定することができ、そこから価電子の運動エネルギー、フェルミ運動量[2]の情報を得ることもできる。これまでの測定では、低密度化に伴う電子ガスモデルとのずれの増大が確認され、粒子間相互作用の影響の増大が示唆されている。本研究では、これまで詳細には測定がなされていない液体 K について、新たに高温液体 K を保持することが可能な試料セルを開発することによりその CP を高い統計精度で測定した。これにより、K の低密度化による価電子状態の変化を調べるとともに、Na, K, Rb の運動エネルギーやフェルミ運動量について電子ガスモデルの密度パラメータ  $r_s$  依存性の観点からの評価を試みた。ここで、 $r_s = (3/(4\pi n))^{1/3}/a_B$  ( $n$ : 価電子数密度、 $a_B$ : ボーア半径)はウィグナー・ザイツ半径とも呼ばれ、電子ガスモデルにおいては  $r_s$  が増大(低密度化)すると電子間相互作用の影響が増大する。

実験は大型放射光施設 SPring-8 のビームライン BL08W において行い、100°C から 1200°C の液体 K に対して 115.6 keV の X 線を照射し、散乱角 165° に散乱された 70-90 keV の X 線を測定した。

測定で得られた液体 K の CP は低密度化に伴いプロファイルが狭小化した。これは低密度化に伴いフェルミ運動量が減少することを意味し、電子ガスモデルの傾向と定性的に一致している。そこで、液体 Na, K, Rb について CP のフーリエ変換を利用してフェルミ運動量を求めると、それは電子ガスのモデルの計算値  $p_F = (9\pi/4)^{1/3} r_s^{-1}$  に良く一致した(Fig. 1)。一方で、CP において実験プロファイルが理論よりも大きい高運動量成分を持ち、低密度化に伴い電子ガスモデルとのずれの増大がするなど、粒子間相互作用の影響が増大することが示唆された。

これらのことから、液体アルカリ金属は電子ガスモデルで良く記述できるとともに、電子ガスモデルで考慮されていない電子間相互作用以外の相互作用の影響も低密度化に伴い増大し、重要な役割を果たしていることが示唆された。本研究ではその他の物理量の密度、 $r_s$  依存性についても議論する。

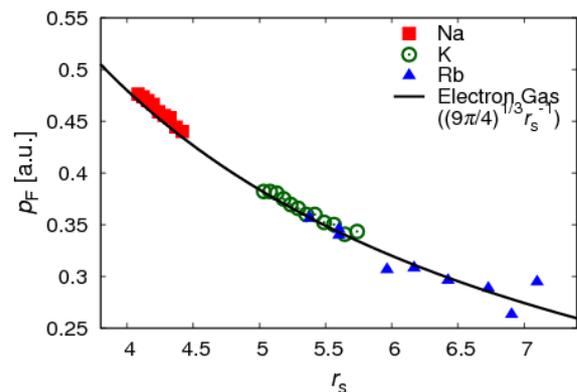


Fig. 1. Fermi momenta of liquid alkali metals.

## References

- [1] F. Hensel and W. W. Warren, Jr., “*Fluid Metals: The Liquid-Vapor Transition of Metals*” (Princeton Univ. Press, Princeton, 1999).
- [2] P. Pattison and B. Williams, *Solid State Commun.* **20**, 585-588 (1976).

# $^{63}\text{Cu}$ -NMR/NQR による単結晶 $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$ の超伝導状態の研究

## Superconducting properties of single-crystal $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$

### probed by $^{63}\text{Cu}$ -NMR/NQR

固体量子物性研究室 樋口匠  
Quantum Materials Laboratory Takumi Higuchi

**Abstract** We have performed NMR/NQR study on single-crystal  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$ . The temperature dependence of the nuclear spin-lattice relaxation rate ( $1/T_1$ ) in the single-crystal sample is quite similar to that in the previous polycrystalline samples.  $1/T_1$  in the superconducting state can be interpreted with the anisotropic gap model, which is contradict with the recent specific-heat result.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

重い電子系超伝導体  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$  は 1979 年に発見された最初の強相関電子系超伝導体である[1]。様々な実験よりその超伝導の性質が通常の BCS 理論の枠組みに収まらないことが指摘され、以来精力的に研究されてきた。発見当初は単結晶の作成が難しかったため、多結晶試料を用いた研究が行われ、核四重極共鳴(NQR)などの実験により超伝導ギャップに線状のノードが存在する  $d$  波超伝導体であると考えられてきた[2]。

ところが、近年純良な単結晶試料の作成が可能になり、単結晶試料を用いた測定がなされるようになった。最近の 50 mK までの低温比熱測定や比熱の角度依存性の実験から、超伝導ギャップはノードを持たないフルギャップであることが指摘された。また、超伝導状態の比熱の振舞いを理解するため、符号の異なる 2 つのフルギャップからなる  $s_{\pm}$  波超伝導状態が提案された[3]。

我々は以前の NQR の実験結果を再検討するため、超伝導性のよい単結晶試料を用いて NQR 及び核磁気共鳴(NMR)測定を行った。図 1 に NQR で測定された核スピン-格子緩和率( $1/T_1$ )の温度依存性を示す。単結晶試料の  $1/T_1$  は 100 mK まで以前の多結晶のデータとほぼ同じであり、フルギャップを示唆する指数関数的な温度依存性は見られなかった。図 2 は超伝導状態の  $1/T_1 T$  の実験結果とそれぞれの超伝導ギャップモデルによる計算値である。図に示すように、 $d$  波に加え、異方的  $s_{\pm}$  波や  $d_x^2 - y^2 + d_{xy}$  波などの異方性の大きいギャップモデルで  $1/T_1 T$  の温度依存性をほぼ再現できる。しかし、この結果は比熱の結果から示唆される等方的ギャップと矛盾している。今後はこの矛盾を理解するために  $1/T_1 T$  の角度依存性等の測定を計画している。

#### References

- [1] F. Steglich *et al.*, Phys. Rev. Lett. **43**, 1892 (1979).
- [2] K. Ishida *et al.*, Phys. Rev. Lett. **82**, 5353 (1999).
- [3] S. Kittaka *et al.*, Phys. Rev. Lett **112**, 067002 (2014).

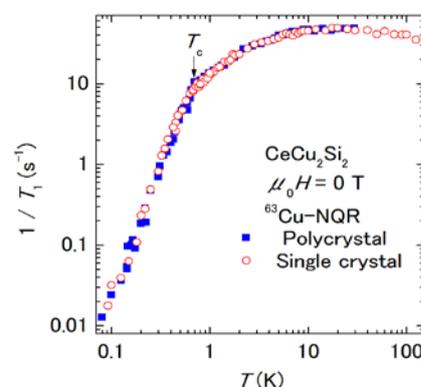


Fig. 1: The temperature dependence of  $1/T_1$  in the single- and poly-crystalline  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$  at zero field.  $T_c$  is determined by

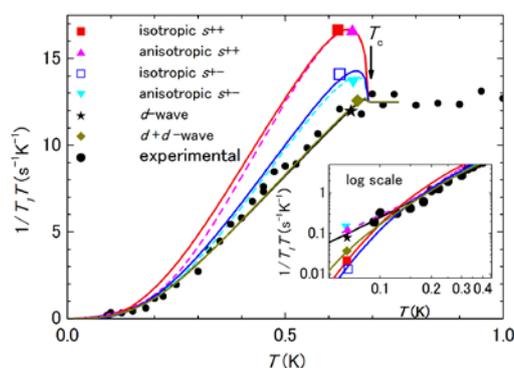


Fig. 2: The temperature dependence of  $1/T_1 T$  in single-crystal  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$ . The calculations of  $1/T_1 T$  based on various superconducting gap models are shown. The inset is the logarithmic scale in low

# 振動現象における発生源の物体推定

非線形動力学研究室 古川雅博

**Abstract** We address the problem of estimating types of coins from the colliding sound. By devising a Bayesian inference machine, we reveal that optimizing the estimation leads the machine to choose frequencies at which individual coins exhibit resonance peaks in their sound spectra.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

振動現象から得られる波形データには振動源に関する情報が含まれている。例えば、電位振動である脳波にはてんかんや認知障害に関する情報が内在している。そのため、脳波はそれらを診断する上での手掛かりとなる [1, 2]。また、空気振動である音波には発生源や反射した物体に関する情報が含まれている。それゆえ、コウモリは超音波から物体を識別することができ [3]、さらに潜水艦では反射ソナー音を機雷の特定に利用している [4]。このように、様々な振動の組み合わせから振動源の情報を引き出すことが可能であると考えられる。

本研究では、硬貨の落下音から硬貨の種類を推定する問題を試みた。硬貨の振動はその形状や材質などによって異なるが、落下音から逆に硬貨の種類を推定することは簡単ではない。そこで我々は有限個の周波数におけるパワースペクトルの値  $x \equiv \{I_{\omega_1}, I_{\omega_2}, \dots, I_{\omega_D}\}$  を取り出し、硬貨の種類を推定する手法を開発した。まず、パワースペクトルが与えられた時の硬貨  $c$  に関する条件付き確率分布  $P(c|x)$  をサンプリングデータから構築した。この分布から最良の推定を行うためには、パワースペクトルの値  $x$  が硬貨ごとに離れ合うような周波数を選択する必要がある。そこで我々はベイズリスク

$$R = 1 - \int dx P(c_x | x) P(x)$$

$$c_x = \arg \max_c P(c | x)$$

が最小となる周波数の組を選択し、推定を行なった。解析の結果、テストデータに対して 90% を超える正答率を得た。さらにベイズリスク最小化によって選択された周波数は安定して特定の値となり、硬貨ごとに特有の共鳴周波数を捉えていることがわかった (Fig. 1) [5]。

応用として、ラットの脳波からそれが記録された時の位置または速さの推定を行うため、我々はこの手法を適用した。解析の結果、一定の推定が可能になることを確認した。さらに選択された周波数は安定して特定の値となり、この事実は選択された周波数の振動が位置または速さに関する情報を表現している可能性を示唆している。このように、本研究で開発した手法は振動源を分類する上で他の振動現象においても有効であると考えられる。

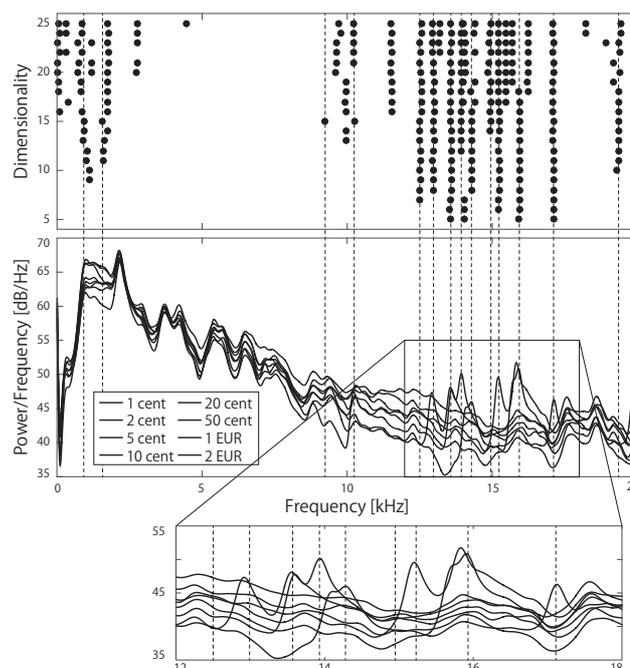


Fig. 1. Selected frequencies and power spectra.

## References

- [1] Tzallas AT *et al.*, IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed. **13**, 703-710 (2009).
- [2] Shoeb A and Guttag J, In Proc. 27th Int. Conf. on Machine Learning, pp. 975-982 (2010).
- [3] Grunwald JE *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. **101**, 5670-5674 (2004).
- [4] Gorman RP and Sejnowski TJ, Neural Netw. **1**, 75-89 (1988).
- [5] Furukawa M and Shinomoto S, Neural Comput. Appl., in press.

# 量子カオスの時系列スペクトルに基づく特徴づけ：量子撃力回転子の解析

非線形動力学研究室 三宅隼斗

**Abstract** We study quantum kicked rotor model as the simplest model of quantum chaos. By investigating time series of the momentum with multifractal analysis, we find that the spectrum is singular continuous. From this result, we conclude that the model exhibits an irregular motion which is essentially different from classical chaos.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

古典力学系における特徴的な運動が量子の世界でも現れるのか、現れるとしたらどういう形で観測されるのかという疑問は素朴だが興味が惹かれる問いである。特に、古典力学系のカオスに対応する複雑な挙動を示す量子ダイナミクスは「量子カオス」とよばれ、精力的に研究されてきた[1]。

本研究では、量子カオスと古典カオスの質的な差を理解することを目的とする。具体的には、次式のハミルトニアンで記述される量子撃力回転子について調べた。

$$H(\hat{q}, \hat{p}, t) = \frac{1}{2}\hat{p}^2 + K \cos(q) \sum_{n=0,1,2,\dots} \delta(t-n) \quad (1)$$

古典撃力回転子の運動は、撃力の強さ  $K$  が十分大きいときにカオスとなる。このとき図 1 に示されるように、運動量の時系列のスペクトルは滑らかである。それに対し、量子撃力回転子の運動量期待値の時系列のスペクトルは全く異なる形になる。スペクトルの具体例を図 2 に示す。本研究では、マルチフラクタル解析で用いられる特異指数[2]により、このスペクトルが特異連続であることを明らかにした。つまり、量子撃力回転子の運動が古典カオスと本質的に異なる非周期的な運動であることを意味する。

さらに、撃力の強さ  $K$  を変化させることにより、量子撃力回転子の運動の様子の変化を議論する。本研究では、古典撃力回転子の場合に知られている KAM 転移とは異なる結果を予想する。

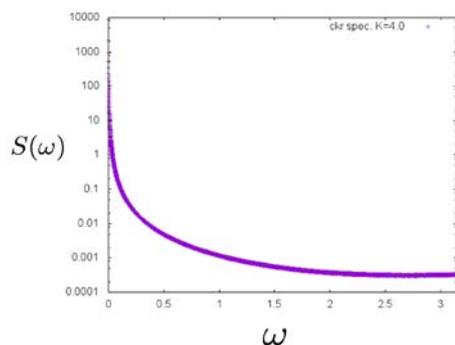


図 1：撃力回転子( $K=4.0$ )から得られる運動量の時系列のスペクトル  $S(\omega)$  の周波数  $\omega$  依存性を表したグラフ。 $\omega$  に関して滑らかな連続スペクトルが得られる。

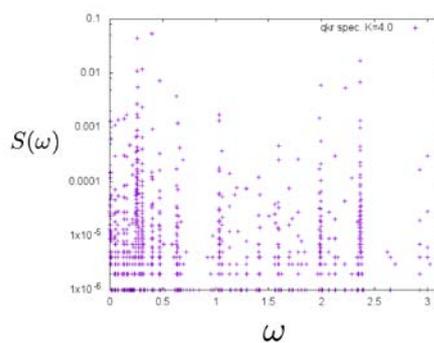


図 2：量子撃力回転子( $K=4.0$ )の場合に、運動量期待値の時系列に対して  $S(\omega)$  の周波数  $\omega$  依存性を表したグラフ。 $\omega$  に関して古典の場合とは異なるスペクトルが得られる。

## References

- [1] F. Haake, Quantum Signatures of Chaos, 3rd ed. (Berlin: Springer-Verlag, 2010)
- [2] C. Godreche, J. M. Luck, J. Phys. A: Math. Gen 23, 3769 (1990)

# 光の軌道角運動量による多重極光電場の制御と物質との相互作用の研究

光物性研究室 森本祥平

**Abstract** We performed time-resolved terahertz near-field imaging of structured metallic plates by a light with orbital angular momentum. We succeeded in excitation into multipole excited state and demonstration of focusing electric field at the narrow metallic gap. Our results pave the way for the transfer of orbital angular momentum to molecules.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

螺旋状波面、即ち多重極光電場を持つ光渦[1]は自身の軌道角運動量を物質の内部自由度に転写することで、高い角運動量を持つ新たな素励起の誘起が実現可能であると期待される。分子に対する軌道角運動量  $l\hbar$  転写の遷移確率には(振動モードのコヒーレント長/ビーム径)<sup>l</sup> という因子がかかるが[2]、ビーム径が回折限界により制限されコヒーレント長に比べて十分大きいと、実現に至っていない。そこで本研究では、特に様々な振動、吸収モードが存在するテラヘルツ( $\sim 10^{12}$  Hz)領域において、コヒーレント長を長くする、及びビーム径を小さくするという二通りの方法により因子(コヒーレント長/ビーム径)<sup>l</sup> を向上し、物質の内部自由度への光の軌道角運動量転写の実現を目指した。

前者の方法においては、テラヘルツ領域で円周上に波長より十分小さい周期的な溝を持つ完全導体円盤に存在する疑似局在表面プラズモン[3]に注目した。このモードは溝内部、外部の電場が結合した集団振動モードとして完全導体円盤外周上に進行波として存在するため、コヒーレント長が長くなっている。また、円周方向の波数で量子化されるため高い角運動量を持つモードが存在し、従って軌道角運動量転写によりそのモードの選択励起が可能となることが示唆される。

そこで、波長以下の空間分解能で時間分解イメージングが可能なテラヘルツ顕微鏡[4]により、疑似局在表面プラズモンの局所場応答を取得した。図1に各励起光を試料に照射した場合のある時刻における近接場分布を示す。試料の外周に沿って特徴的な電場パターンが観測され、軌道角運動量の絶対値が大きくなるほど量子数の増加を反映した複雑なパターンが確認された。この結果は、疑似局在表面プラズモンへの軌道角運動量転写の実現により高い角運動量を有する多重極モード(多重極光電場)が選択励起されたことを示唆し、多重極モードの励起選択則[5]とも一致することが分かった。

後者の方法においては、二つの金属粒子間の微小なギャップに存在するギャップモードに注目した。このモードはギャップが狭くなるほどより狭い空間に電場閉じ込めが可能となることから、回折限界を超える集光実現に適した現象であると言える。本研究ではダイポールアンテナが放射状に配列した構造[6]のギャップモードを介して回折限界を超える集光の実現を試みた。図2に構造がない場合とある場合にガウスビームを照射した場合の強度分布を示す。ガウスビーム(直径 300  $\mu\text{m}$  程度)を構造に照射することにより、構造の中空部分(直径 60  $\mu\text{m}$ )に電場が集中している様子が観測された。この結果を応用することで、このアンテナ構造により光渦の回折限界を超える集光が可能であることが示唆される。

## References

- [1] L. Allen *et al.*, Phys. Rev. A. **45**, 8185, 1992.
- [2] A. Alexandrescu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 243001, 2006.
- [3] A. Pors *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 223905, 2012.
- [4] F. Blanchard *et al.*, Opt. Express **19**, 8277, 2011.
- [5] K. Sakai *et al.*, Sci. Rep. **5**, 8431, 2015.
- [6] R. W. Heeres *et al.*, Nano Lett. **14**, 4598, 2014.

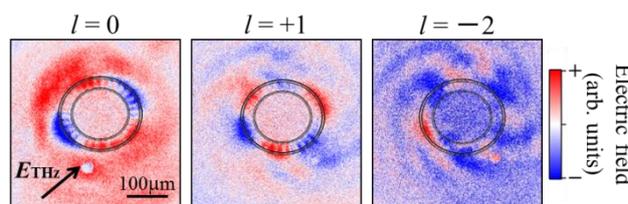


Fig. 1. Temporal snapshots of terahertz electric field around the sample excited by Gauss ( $l=0$ ) and vortex ( $l=+1, -2$ ) beam. Two concentric circles show the outer and inner radii of the sample.

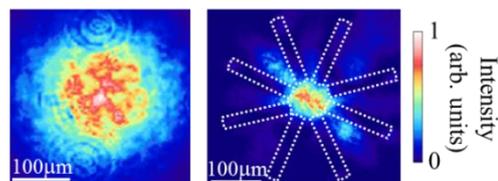


Fig. 2. The intensity distribution (at 0.6 THz) without and with the sample (white dot lines).

# 画像認識深層ネットワークと脳視覚野の情報処理の比較

非線形動力学研究室 吉田和輝

**Abstract** We compared neural representations in visual cortex with representations in a deep neural network. The model's bottom layer turns out to be highly predictive of spiking responses to texture images in the primary visual cortex, and its intermediate layers are highly predictive of neural responses in a midlevel ventral area.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

脳視覚野の演算は階層的であり、その機構は物体認識のためのモデルにも応用されている。網膜に入射した光は神経細胞の発火活動へと変換され、網膜で明暗情報が、低次視覚野で線分情報が、さらに高次の領野で複雑な形状情報が抽出されるなど、視覚野情報処理は階層的に行われる[1, 2]。この仕組みを模倣して、畳み込みニューラルネットワークが提案された。その提案以降、このモデルは神経科学とは独立に発展を続け、現在では深層学習という手法を用いることで人と同程度の物体認識が可能となっている[3]。このような高い物体認識能力を持つモデルから視覚野の研究における新しい手掛かりを得るべく、脳とモデルを比較する取り組みが近年始まった。Yamins らは畳み込みニューラルネットワークの上位層が高次視覚野である IT 野に、中間層が視覚野の中間領域である V4 野に対応することを示した[4]。本研究では、大阪大学の研究グループから実験データを提供してもらい、これに対し Yamins らと同様の解析を行った。先行研究は物体認識時の神経活動の解析であったが、本研究は色や模様といったテクスチャ画像認識時の神経活動の解析である。

我々はまず、単一神経細胞の活動とモデルの単一素子出力の反応類似性を評価した。次に画像提示時の神経細胞の発火頻度  $f$  を推定するために、モデルの素子出力  $x$  を入力とした線形回帰と Lasso 回帰を行った。そして推定の精度をあらゆる Explained Variance に基づいて、脳の領野とモデルの階層に対応関係が認められるかを調べた。さらに、脳内の情報伝達の遅延を確認するために、時系列の神経活動に対しても同様の解析を行った。

推定に用いるモデルを比較した結果、重み  $w$  にスパース性を課す Lasso 回帰 (Eq. 1) により神経活動の推定精度が上昇することを確認した。

$$E(w) = \sum \{f - w\phi(x)\}^2 + \alpha \sum |w| \quad (1)$$

また異なるモデル層に基づく推定の精度を比較することで、深層ニューラルネットワークの低次層は低次視覚野である V1 野を、中間層は V4 野をより良く説明する一定の傾向があることを示した。さらに時系列的な発火頻度推定によって、生理学的な知見と一貫性のある情報伝達の遅延を確認した (Fig. 1)。我々の解析において先行研究と異なる点は高次視覚野である。推定精度は他領野と比べ低く、またモデル層ごとの推定精度の差異も確認されなかった。これらの違いは、物体画像とテクスチャ画像を見ている時の IT 野の神経活動が異なっている可能性を示唆している。

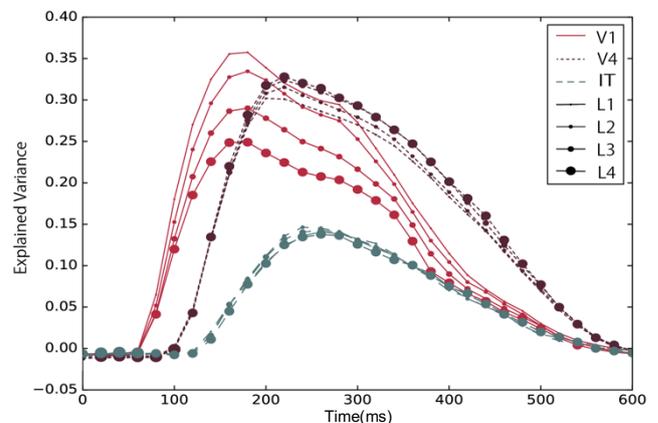


Fig 1. The time dependences of the neural predictivity for different brain areas.

## References

- [1] Felleman DJ and Van Essen DC, Cereb Cortex. **1**, 1-47 (1991).
- [2] Logothetis NK and Sheinberg DL, Annu Rev Neurosci **19**, 577-621 (1996).
- [3] Kaiming He *et al.*, arXiv, 1502.01852 (2015).
- [4] D.L.K. Yamins *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. **111**, 8619-8624 (2014).