

平成 2 6 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 5 年 2 月 2 日 (月)、 2 月 3 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）

2015 年 2 月 2 日（月） 9：00～

目 次

1. GaAs 量子井戸中励起子における時間領域テラヘルツ非線形光学応答
内田 健人（ 9：00）・・・ 1
2. 重い電子系人工超格子における量子臨界性の精密制御
遠藤 僚太（ 9：20）・・・ 2
3. 流体相互作用による微小油中水滴の周期運動ダイナミクス
大村 拓也（ 9：40）・・・ 3
4. Lieb 型光格子中の極低温量子縮退気体の高分解能レーザー分光
小沢 秀樹（10：00）・・・ 4
5. 低次元系の異常熱伝導における裸の輸送係数の理解に向けて
佐藤 大祐（10：20）・・・ 5

10：40～10：50 休憩

6. 量子状態の幾何学的構造と伝導現象
—磁気スカーミオンの物理および Quantum Metric 由来の臨界現象
高嶋 梨菜（10：50）・・・ 6
7. X 線自由電子レーザーを利用した X 線小角散乱・イオン・蛍光分光の同時測定
西山 俊幸（11：10）・・・ 7
8. ランダム場を駆動される O(N)モデルにおける非平衡相転移
芳賀 大樹（11：30）・・・ 8
9. 膨潤 SmC*相における C-director の配向相関とダイナミクス
畑 加奈子（11：50）・・・ 9
10. 重力逆二乗則の検証に向けたレーザー冷却 Yb 原子の高感度イオン検出装置の開発
高橋 功（12：10）・・・ 10

12：30～13：30 昼休み

11. 二成分液体中のヤヌス粒子の自己駆動運動
深井新太郎（13：30）・・・ 11

1 2. 剪断流中における単一気泡の重力下での運動の解析	秋田 峻佑 (13 : 50)	12
1 3. ^{77}Se -NMR を用いた鉄系超伝導体 FeSe のゆらぎと超伝導の研究	新井 健司 (14 : 10)	13
1 4. 非弾性 X 線散乱による液体 Si のプラズモン測定	石黒陽太郎 (14 : 30)	14
1 5. コーヒーの湯気：熱水表面に浮遊する湯気とその集団消滅現象	梅木 崇浩 (14 : 50)	15

15 : 10 ~ 15 : 20 休憩

1 6. 長距離相互作用のある一次元フェルミオン模型のダイナミクス	太田 卓見 (15 : 20)	16
1 7. 自己励起過程の自発的なバースト現象	翁長 朝功 (15 : 40)	17
1 8. 多孔質ガラス中での超流動ヘリウム3	木崎 泰英 (16 : 00)	18
1 9. 球面上の自己駆動粒子系の数値解析	金 泰燁 (16 : 20)	19
2 0. 磁場侵入長の精密測定による LaFeAsO_{1-y} 及び関連物質の超伝導ギャップ構造の研究	藏田 聡信 (16 : 40)	20

17 : 00 終了

2015年2月3日(火) 9:00~

21. ニューラルネットワークの結合推定に必要なスパイク列の時間長さ
栗田 修平 (9:00).....21
22. 磁気トルク測定による FeSe の常磁性磁化率の磁気異方性
小林 遼 (9:20).....22
23. 水酸基含有液晶 I-7 のフラストレートスメクチック C 相の発現要因
佐藤 隆人 (9:40).....23
24. 各点磁場中冷却過程による Sr₂RuO₄ の交流磁化率と渦糸状態
柴田 大輔 (10:00).....24
25. 圧力下における 強磁性超伝導体 UCoGe の ⁵⁹Co 核四重極共鳴(NQR)
杉本 大輔 (10:20).....25

10:40~10:50 休憩

26. 疑似表面プラズモンをもちいた光の軌道角運動量に関する光学遷移選択則の研究
平岡 友基 (10:50).....26
27. 平行平板中の超流動 ³He のテクスチャ
本田 弦 (11:10).....27
28. X線コンプトン散乱測定による低密度液体ナトリウムの電子運動量密度
宮武 至 (11:30).....28
29. ネマチック液晶の配向秩序度変化による金ナノ粒子のマニピュレーション
森田 智之 (11:50).....29
30. 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 (12:10)

12:30 終了

GaAs 量子井戸中励起子における 時間領域テラヘルツ非線形光学応答

光物性研究室 内田健人

Abstract Time-resolved terahertz pump and NIR probe experiments elucidate that optical excitonic absorption peak in GaAs quantum wells shows Rabi splitting under resonant excitation of intraexcitonic 1s-2p transition. Broadening of exciton resonance suggests that 1s-excitonic decoherence is promoted by terahertz-light-induced ionization of the 2p exciton state through 1s-2p Rabi-flopping.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

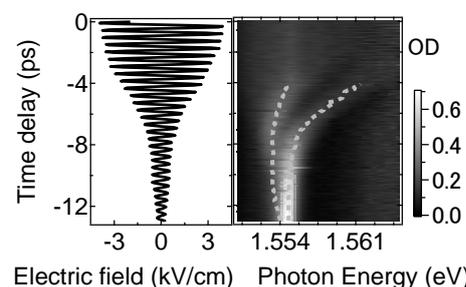
光と物質の相互作用の大きさの指標であるラビ分裂エネルギー $\hbar\Omega_{\text{Rabi}} = \mu E$ (μ :遷移双極子モーメント, E :電場振幅)がその遷移エネルギーに近づくと、非摂動的な光学応答の領域に到達し、原子系では高次高調波の発生などの特異な非線形な応答が観測される[1]。水素原子様のエネルギー構造をもつ半導体中の励起子は、テラヘルツ (THz: 10^{12} Hz) 周波数帯に内部遷移をもち、原子系と比較して低電場強度で非摂動的な領域へと達する。さらに THz 周波数帯では、ポンデラモティブエネルギーと呼ばれる光電場が一周あたり電子に与える運動エネルギーも遷移エネルギーに近づき、光の物質系に対する振る舞いが光子描像と電場描像の中間領域になる。THz 周波数帯では、比較的容易にこの3つのエネルギースケールが拮抗する電場強度を実現できるため、非摂動的な非線形光学現象が顕著に現れる。実際に、励起子系において高強度 THz 光照射によるラビ分裂[2]や動的フランツケルディシユ効果[3]などが観測されてきた。

このような非線形現象のダイナミクスは3つのエネルギーに対応した時間スケールと励起子の位相緩和時間によって決定されるため、時々刻々変化する THz 光電場に対する時間領域の応答を観測すること重要となる。しかし、これまでの光源ではパルス内での光電場の位相揺らぎが大きいため、実験的な困難が存在した。

そこで本研究では位相のロックされた狭帯域 THz 光を開発し、励起子内部遷移を高強度励起下で近赤外 (NIR) 域の 1s 励起子非線形光学応答が観測可能な、フェムト秒 THz ポンプ-NIR プロブ実験を行った。図 1(a)は狭帯域テラヘルツ光電場の時間波形で、(b)は吸収スペクトルの時間変化である。2つを比較すると電場振幅の増大に伴って 1s 励起子吸収(1.554 eV)がラビ分裂するとともに、ブルーシフトや線幅の増大を示すことがわかる。また測定した各時刻の分裂エネルギーの電場依存性は、その時刻の電場ではなく励起子分極の位相緩和時間で平均された有効電場で決定されることがわかった。この有効電場の概念を用いて位相緩和時間を実験データから評価した結果、THz 電場強度が増加するとともに位相緩和時間が減少することが分かった(図 2)。この振る舞いは、THz 光により結合した 2p 状態からの光イオン化過程を考えると説明できる。これは、非摂動的な領域ではコヒーレントな過渡現象そのものが位相緩和を誘起することを示している。

References

- [1] A. Baltuska *et al.*, Nature **421**, 615(2003).
- [2] K. B. Nordstrom *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81** 457(1998).
- [3] M. Wagner *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 167401 (2010).



Electric field (kV/cm) Photon Energy (eV)

Fig. 1. (a) Temporal profile of THz electric field measured by EO-sampling (b) Absorption spectrum as a function of time delay between pump and probe pulses. Dash lines show excitonic peaks.

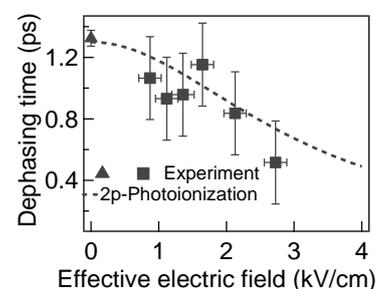


Fig. 2. Dephasing time of 1s excitonic coherence estimated by experimental data (triangle and squares) and calculation (dash line).

重い電子系人工超格子における 量子臨界性の精密制御

固体電子研究室 遠藤 僚太

Abstract By using molecular beam epitaxy, we fabricated artificial superlattices $\text{CeRhIn}_5(m)/\text{YbRhIn}_5(7)$ with the alternating layers of antiferromagnetic heavy-fermion CeRhIn_5 ($m = 2, 3, 4, 5, 9$) and nonmagnetic metal YbRhIn_5 . By controlling dimensionality and by applying magnetic field, we succeeded in fine tuning the quantum critical point in these heavy fermion superlattices.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

絶対零度において圧力等の外部パラメータを変化させることによって引き起こされる相転移は、量子相転移と呼ばれる。その相境界は量子臨界点と呼ばれ、量子臨界点における量子揺らぎのために、有限温度においても特異な物性が現れる。 f 電子を含む希土類金属間化合物は重い電子系と呼ばれ、量子臨界点近傍において非フェルミ液体や非従来型超伝導状態などが観測されている。

最近、我々の研究グループでは、重い電子系物質と通常金属の超格子を作製することにより、重い電子の2次元閉じ込めによって量子臨界性が制御可能であることを明らかにした[1,2]。本研究では、重い電子系反強磁性体である CeRhIn_5 [3]を用いた人工超格子をはじめて作製し、量子臨界点近傍の特異な物性を観測することを試みた。

分子線エピタキシー法を用いて、 m 層の CeRhIn_5 と 7 層の非磁性金属 YbRhIn_5 を交互に積層させた $\text{CeRhIn}_5(m)/\text{YbRhIn}_5(7)$ 超格子を作製した。この超格子は m を小さくすることによって、 CeRhIn_5 の低次元化が可能である。Fig. 1 は反強磁性転移温度 T_N と、 CeRhIn_5 の層数の逆数 $1/m$ の相図である。低次元化により、 T_N が抑制されており、 $m \sim 3$ 付近に $T_N = 0$ となる量子臨界点の存在が示唆される。実際 $m = 3$ の超格子では明確な反強磁性転移が確認されず、量子臨界点近傍に位置していると考えられる。Fig. 2 は磁場 B 、温度 T に対して、 $m = 3$ の超格子における電気抵抗率の温度依存性の指数 α ($\rho = AT^\alpha + \rho_0$) を示したイメージプロットである。 $B \sim 1.5$ T では低温領域まで電気抵抗率の温度依存性が、フェルミ液体的振る舞い ($\alpha = 2$) とは異なる非フェルミ液体的振る舞い ($\alpha \sim 1$) を示している。これらの結果は、次元性および磁場というパラメータにより、量子臨界点への精密制御に成功したことを示している。

References

- [1] H. Shishido *et al.*, Science **327**, 980-983 (2010).
- [2] Y. Mizukami *et al.*, Nature Physics **7**, 849-853 (2011).
- [3] H. Hegger *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 4986-4989 (2000).

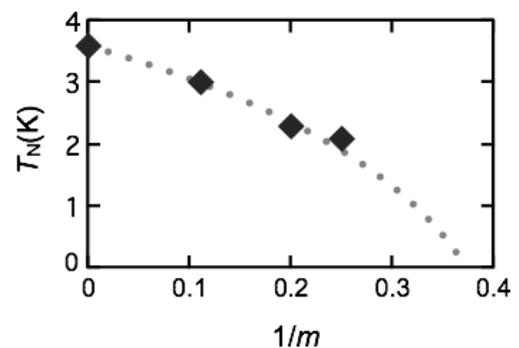


Fig. 1. Antiferromagnetic transition temperature T_N as a function of $1/m$

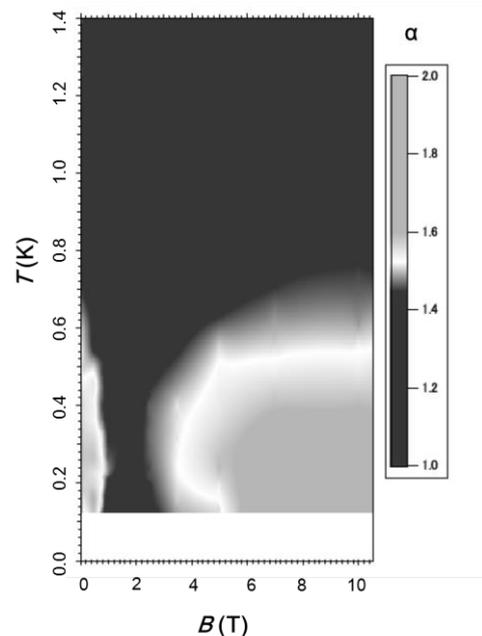


Fig. 2. The exponent α ($\rho = AT^\alpha + \rho_0$) is mapped in the T versus B diagram.

流体相互作用による微小油中水滴の 周期運動ダイナミクス

時空間秩序・生命物理研究室 大村拓也

Abstract Collective motion of water-in-oil droplets that flow in microfluidic channel is studied experimentally and numerically. For different sized droplets, droplets either move back and forth or form a cluster. Numerical analysis indicates the oscillation is explained by inter-droplet interactions with a considerable boundary effect.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

鳥の群れや微生物による対流など、動く粒子や物体が相互作用し集団となることで秩序やパターンを形成する集団運動が起きる事が知られている。集団レベルで生じる秩序の形成メカニズムの解明は、非線形科学・非平衡物理学のみならず生命科学や生態学に広がる重要な課題の一つである。近年、微小流路を用いて作成した油中水滴の集団や、モータータンパク質とそのレールとなるフィラメントの複合系など、相互作用する要素を多数均質に生成する実験系が可能になってきている。これらを用いて、理論的な研究が主体であった集団挙動を実験から詳細に解析されつつある [1, 2]。特に、マイクロ流体デバイス中の微小水滴の集団運動は、液滴周りを流れるオイルによる流体相互作用に起因しているため、要素間の相互作用の役割について実験・理論の両面から解析する良いモデルである。これまでの研究ではサイズや形が揃った液滴から起こる秩序形成や不安定化は幾つか報告されているが、多種の要素からなる集団についての研究は殆どなされていない。本研究では大きさの異なる水滴を集団化させた実験系を新たに構築することに成功し、振動やクラスター形成といった新規の運動とパターンを発見した。さらに得られた現象を理解する上で、水滴同士の要素間相互作用に加えて水滴と壁との壁面相互作用が重要な役割を持つことを見出した。

実験では、大水滴 ($140\ \mu\text{m}$) と小水滴 ($20\ \mu\text{m}$) が交互に一直列で配列される流路を新たに設計し、シリコン樹脂 (PDMS) を用いてマイクロ流体デバイスを作製した。このデバイス内に水滴を流して、水滴同士の運動を倒立顕微鏡で計測したところ、大水滴間を小水滴が往復するように速度が振動することがわかった (Fig. 1(a))。水滴の速度をプロットして比較してみると、大水滴速度は $v=1.2\ \text{mm/s}$ で一定であるのに対し、小水滴速度が 1.0 と $1.4\ \text{mm/s}$ の間で周期的に変化する (Fig. 1(b))。また、複数の小水滴が大水滴間に配置されると、小水滴はクラスターを形成し、回転しながら振動する。このような振動現象が生じるメカニズムを明らかにするため小液滴の振動を詳細に解析したところ、小水滴は往復運動の間に高さ方向 (z 方向) に対しても変位していることがわかり、その周期性は速度の振動と一致することを見出した。その結果から、小水滴は右の大水滴周りの流れによって重心が下げられて壁面との摩擦で減速し、左の大水滴周りの流れで壁面から離れて加速する結果、振動が生じると考えられる。そこで大水滴周りに形成される速度場と z 方向の固体壁の影響を考えたモデルを提案し、格子ボルツマン法を用いた流体数値計算を行うことでモデルの理論的整合性を確認した (Fig. 1(c))。

本発表では実験と流体数値計算の詳細について述べるとともに、異種間の相互作用が集団の秩序形成に果たす役割について議論する。

References

- [1] Yutaka Sumino, et al., Nature 483, 448 (2012).
- [2] Tsevi Beatus, et al., Nature Physics 2, 743 (2006).

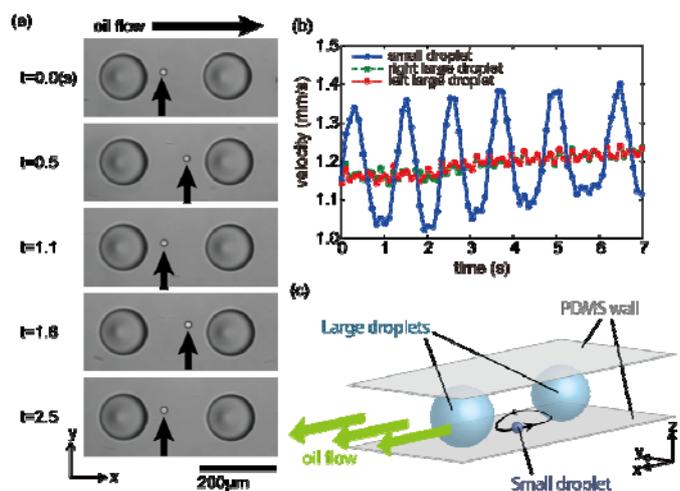


Fig.1. (a) Snapshots of a small droplet oscillating between large droplets. The arrows point the oscillating droplet. (b) The velocities of the small and large droplets. (c) The schematic model of the oscillation. Oil flow is in x-direction.

Lieb 型光格子中の極低温量子縮退気体の 高分解能レーザー分光

量子光学研究室 小沢秀樹

Abstract We succeeded in resolving three sublattices in an optical Lieb lattice by laser spectroscopy, which could be applied to probing a magnetic order in the lattice. In addition, a method to load a BEC into a flat band is developed, which paves the way for a possible supersolid phase.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

特異なバンド構造をもつ非標準型の格子は、興味深い物性を発現することが期待され多くの研究の対象となっている。その中でも、我々は平坦バンド及びディラックコーンを有する Lieb 格子に注目している。これは Fig.1 のような格子構造をもっている。バンド構造に起因する現象として、平坦バンド強磁性がある。その存在は、絶対零度でかつバンドが完全に平坦であるという特殊な状況で厳密に証明されているが[1]、より現実的な状況での遍歴強磁性状態を調べることは、そのメカニズムの解明につながる。また、カゴメ格子も Lieb 格子と同様に平坦バンドをもつが、その平坦バンドにボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)を導入することで超固体相が発現することが予想されていて[2]、Lieb 格子中でも超固体相が期待される。

本研究では、光が中性原子に対して生成する格子、「光格子」として、Lieb型光格子を実現し、そこへイッテルビウム(Yb)量子縮退気体を導入することで、平坦バンド強磁性や超固体相の実現に向けた実験を行った。まず、平坦バンド強磁性に関しては、その磁気秩序状態の観測手法の確立のために、Ybがもつ狭線幅遷移($^1S_0 \leftrightarrow ^3P_2$)を利用した高分解能レーザー分光を行った。その結果、Lieb 型光格子の単位胞中の3サイトを識別して観測することに成功した(Fig.2)。将来的に転移温度以下への冷却を行うことで磁気秩序を生成し、本手法においてスピン選択的に励起することで、各サイトのピーク強度の違いとして磁気秩序をプローブすることを計画している。さらに、平坦バンド強磁性の発現において重要なパラメータであるバンドの平坦性を確認するために、Bragg分光実験にも取り組んだ。2点の準運動量に対して、平坦バンドである第2バンドのエネルギースペクトルを直接観測した。

一方、超固体相の実現に向けた実験では、BECを平坦バンドに導入する手法を考案した。通常、BECは基底バンドの底に分布するが、サイト間にポテンシャル差をつけて時間発展に伴い位相を印加することで人工的に第2バンドへ導入できる。断熱的バンドマッピングによって第2バンドへのBECの分布を確認することに成功した(Fig.3)。今後は、平坦バンド中の原子がサイトに局在することを確認した上で、超固体相に特徴的な運動量分布をTOF法によって観測することを計画している。

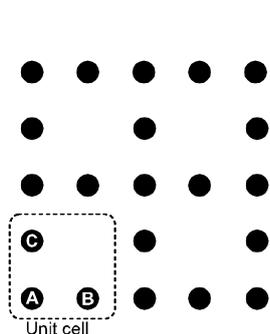


Fig.1 Lieb lattice configuration. A unit cell has three sublattices.

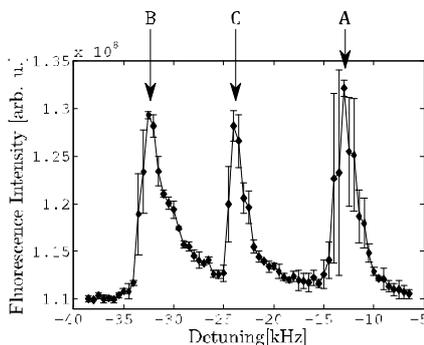


Fig.2 Spectrum with ^{174}Yb BEC in an optical Lieb lattice. Populations at three sublattices are resolved.

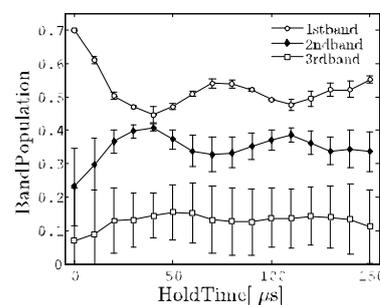


Fig.3 Time evolution of band population. At 40 μs , 2nd band is most populated.

References

- [1] E. H. Lieb, Phys. Rev. Lett. **62**, 1201(1989).
- [2] S. D. Huber *et al.*, Phys. Rev. B **82**, 184502 (2010).

低次元系の異常熱伝導における 裸の輸送係数の理解に向けて

非線形動力学研究室 佐藤大祐

Abstract We investigate heat conduction in one-dimensional systems by using molecular dynamics simulation. It has been known that the heat conductivity exhibits a power law divergence of system size in such systems. We attempt to elucidate the nature of the anomalous heat conduction by exploring the connection between the bare heat conductivity and current fluctuations. Toward the goal, we measure the heat conductivity by the following three methods: (i) direct measurement in steady state, (ii) the measurement through the Green-Kubo formula, and (iii) the measurement in relaxation behavior. We find that the heat conductivity obtained in the three methods takes different values.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

マクロな現象を記述する際には一般に、個々の物質に依らない普遍法則と物質を特徴付ける現象論定数が必要になる。熱伝導現象を例にとれば、熱拡散方程式が普遍法則、熱伝導係数が現象論定数である。線形応答領域においてはグリーン久保公式[1]によって、その現象論定数はミクロな情報を担うカレントゆらぎと結びつけられた。ところで、並進対称性を保つ低次元系では、熱伝導係数がシステムサイズのべきに比例して発散することが知られている[2]。この現象は異常熱伝導現象と呼ばれる。異常熱伝導の理解には、メソスケールの現象論的方程式である揺らぐ流体方程式が重要な役割を果たした。

異常熱伝導の物理的描像は、揺らぐ流体方程式の見地からすれば次のようになる。すなわち、流体要素上の正常熱伝導に対し、保存量である運動量の寄与が繰り込まれて、静止座標系では異常熱伝導が生じる。あるいは、並進対称な系では全運動量が保存しているので、その運動量密度場のゆっくりと空間変調する成分の相関時間は長く、それが輸送係数の異常成分となる。この揺らぐ流体方程式による記述は数値実験の結果と整合している[3]。

一方、ゆらぐ流体方程式のミクロな力学との対応は明らかではない。上の描像が正しければ、裸の輸送係数と呼ばれるメソスケールの現象論定数もまた何らかのカレント揺らぎと関わっていると予想される。この予想は正しいだろうか。もし正しければ、この両者を結ぶ関係式を見だし、それを通して異常輸送の理解を深めたい。

この動機の下、本研究では1次元空間で定義された N 粒子ハミルトン系の数値実験を行った。具体的には、エネルギー密度の連続の式からエネルギーカレントのミクロな表式を決め、粒子の運動エネルギーによって温度を局所的に定義することで、エネルギーカレントと温度勾配の比から問題の熱伝導係数が定まる。主たる数値実験として、非平衡定常環境下での熱伝導係数の測定、線形応答理論の与える熱伝導係数の測定、非平衡緩和実験による熱伝導係数の測定を行った。その結果、これらの輸送係数の値はそれぞれ異なる値をとりうること、さらには境界の影響を強く受けることなどがわかった。残念ながらメソスケールの現象論定数の議論にはまだほど遠いところにいる。

References

- [1] R. Kubo, M. Toda, and N. Hashitsume, “*Statistical Physics II*”, (Springer Series in Solid State Sciences, Vol. 31, Springer, Berlin, 1991.)
- [2] S. Lepri, R. Livi, and A. Politi, *Phys. Rep.* 377 (2003) 1-80.
- [3] O. Narayan and S. Ramaswamy, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 200601 (2002).

量子状態の幾何学的構造と伝導現象 —磁気スカーミオンの物理および Quantum Metric 由来の臨界現象

凝縮系理論 高嶋梨菜

Abstract Geometrical structures of quantum states induce interesting phenomena. In the first part of the thesis, we investigate the conduction phenomena in the merging of magnetic skyrmions in chiral magnets. In the second part, we studied critical phenomena induced by the quantum metric.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

量子状態の幾何学的構造は興味深い伝導現象を誘起しうることが知られている。本研究では、カイラル磁性体でのスカーミオンの結合と遍歴磁性の相転移における臨界現象について、幾何学的構造の観点から議論し、新しい現象の提案を行う。

前半はスカーミオンの電磁現象を議論する。渦などのようにトポロジカルに安定な構造をもつ物体のダイナミクスは、多様な現象を引き起こすことが知られている。磁性体中で観測されているスピン構造の磁気スカーミオンもトポロジカルな構造をもつが、最近、カイラル金属磁性体 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$ 中で2個のスカーミオンが1個に合体するダイナミクスが報告された^[1]。 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$ のある相では、スカーミオンは三角格子を組むように配列して安定に存在するが、磁場と温度を操作することで、そのスカーミオンが消失していく。このとき、スカーミオンが合体して数を減らす様子が試料表面で観察され、数値計算により合体点におけるスピン構造のモノポールの生成が示された。また、このようなスカーミオンやモノポールなどのスピン構造やそのダイナミクスは、伝導電子に対して有効的な電磁場のように作用することが知られており^[2]、非自明な実空間のベリー曲率を与える。

そこで本研究では、スカーミオンの合体過程における遍歴電子の伝導現象を議論した。特に、スカーミオンやモノポールのダイナミクスにより誘起される電流や有効的な電磁場の計算を行った^[3]。このとき伝導電子に働く効果として、スピン構造との結合に加えて、結晶構造の空間反転対称性の破れから生じるスピン軌道相互作用が重要である点に着目した。カイラル磁性体において、このようなスピン軌道相互作用はスキルミオンの生成に不可欠なジャロシンスキー・守谷相互作用を生み出すが、他方、電子の伝導現象にも非自明な効果を与える。そして、このようなスピン軌道相互作用は波数空間の非自明なベリー曲率を与える。ベリー曲率を用いた半古典運動方程式に基づく計算により、スカーミオンの合体過程によって無散逸の断熱流が誘起されることを示した。さらに準古典展開による電流の計算により、空間移動するモノポールが、有効的な磁荷と電荷の両方をもっているダイオンのようにふるまうことも明らかにした。

後半は、ベリー曲率とは異なる幾何学量として、quantum metric に着目し、quantum metric が非自明に存在する系に特有の臨界現象について議論する。光学伝導度の特徴的な寄与に quantum metric が現れることを示し、相転移近くの磁気ゆらぎによって生じる変化を明らかにした。

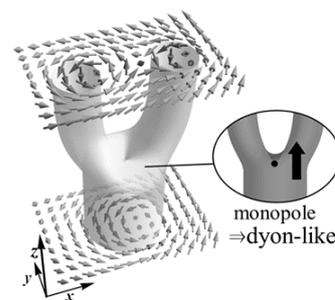


Fig. 1. Schematic illustration of the merging of two skyrmions.

References

- [1] P. Milde *et al.*, Science **340**, 1076 (2013).
- [2] G. E. Volovik, J. Phys. C Solid State Phys. **20** (1987) L83.
- [3] R. Takashima & S. Fujimoto, J. Phys. Soc. Jpn. **83** (2014) 054717

X線自由電子レーザーを利用した X線小角散乱・イオン・蛍光分光の同時測定

不規則系物理学研究室 西山俊幸

Abstract Single-shot small-angle x-ray scattering experiments of xenon clusters have been carried out at SACLA. We observed a clear diffraction image from a single sub-micron xenon cluster with a single X-FEL pulse in coincidence with fluorescence spectrum and ion time-of-flight spectrum from the cluster. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

近年に開発が進んでいる X 線自由電子レーザー (X-FEL) により、X 線領域でフェムト秒の短パルスかつコヒーレントな光を用いた実験が可能となっている。X-FEL を用いたシングルショット・イメージングにより、ナノ粒子や生体高分子など非結晶構造を持つ物体の三次元構造解析を、空間的・時間的に高い分解能で行うことが期待されている。また X-FEL は高強度出力が可能であり、X 線での多光子吸収などの非線形効果が実験的に観測できる[1]。

一方で高強度 ($\sim 10^{11}$ photons/pulse) な X-FEL の照射により、単一 X 線パルス内で試料の電子数が変化すること (ここでは電子損傷とよぶ)、単一 X 線パルス内でイオン化が進み静電反発力が増大した結果、構成原子が移動すること (ここではイオン損傷とよぶ) が予想される[2]。特に電子損傷は原子形状因子を変化させるため、X-FEL を利用する X 線回折を行う上で考慮すべき問題である。そのため本研究では X 線回折と他の分光測定技術を組み合わせ、X-FEL 照射による放射線損傷の評価を目指す。試料としては、構造などがよく規定された単一の希ガス原子から成るクラスターを利用した。

本研究では単一 X 線パルスごとの X 線小角散乱 (SAXS) と蛍光・イオン分光の同時測定実験を、Spring-8 内の X-FEL 施設である SACLA[3]から供給されるコヒーレント X 線を用いて行った。実験は SACLA のビームライン 3, 実験ハッチ 3 で行い、超音速ジェット法により生成されたキセノン (Xe) クラスターに波長 2.2 Å (5.5 keV) の X-FEL を照射し、その散乱像と蛍光およびイオンのスペクトルを測定した。単一パルスでも十分な散乱強度を得るため、数百 nm の Xe クラスターを作成した。図 1 のように単一パルスで Xe クラスターの散乱像が得られた。希ガスクラスターはサイズが大きくなると fcc 結晶構造を有すると予測されているが[4]、得られた散乱像からは球に近い対称性を有していることが示唆された。また蛍光・イオンスペクトルの同時測定に成功し、回折像と強い相関があることを見出した。

References

- [1] M. Richter *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **43**, 194005 (2010)
- [2] R. Neutze *et al.*, Nature **406**, 752 (2000)
- [3] T. Ishikawa *et al.*, Nature Photonics **6**, 540 (2012)
- [4] T. Ikeshoji *et al.*, Phys. Rev. E **63**, 031101 (2001)

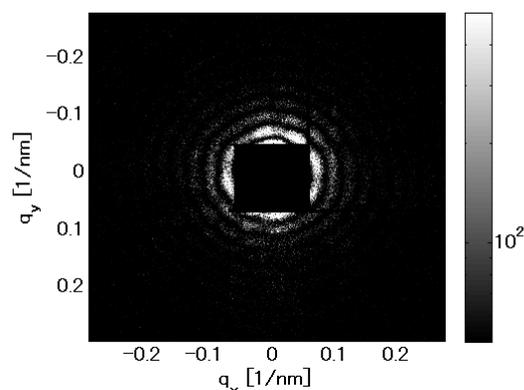


Fig. 1. A typical SAXS image from single giant Xe cluster. The diameter and FEL fluence were estimated to 260 nm and $10 \mu\text{J}/\mu\text{m}^2$, respectively.

ランダム場を駆動される $O(N)$ モデルにおける非平衡相転移

非線形動力学研究室 芳賀大樹

Abstract Three-dimensional $O(N)$ spin models driven with a uniform velocity over a random substrate are studied. We show that in the strong driving regime this system exhibits the quasi-long-range order, in which the spatial correlation function decays in a power-law form.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

秩序構造を持つ熱力学的系が非平衡外力により駆動された際に示す複雑な振る舞いは、統計物理学の分野において長い間、多くの研究の対象となってきた。それらの研究では、平衡系における相転移の性質が非平衡外力の存在によってどのように変わるのかに関心が持たれてきた[1]。一方で、空間的な非一様性を生み出すランダムな摂動の存在も系の相転移の性質に顕著な影響を及ぼし得る[2]。この論文の目的は、これらの二つの要素が共存し、互いに拮抗するような系において、どのような新奇な相構造や相転移ダイナミクスが出現するのかを理解することである。ここではそうした系の単純な例として、ランダムな媒質中を駆動されるスピンモデルのダイナミクスを調べた。

この論文で対象とするのは、時間に依存しないランダム場中を一様な速度で駆動されている 3 次元 $O(N)$ スピンモデルである。解析的、及び数値的な手法を用いて、このモデルの示す非平衡相転移の性質を調べた。その結果、この系は大きな駆動速度のもとで準長距離秩序を示すこと、加えてその準長距離秩序相から無秩序相への転移は、2 次元 XY モデルが平衡状態で示す Kosterlitz-Thouless 転移とよく似ていることが判明した(下図)。この準長距離秩序相は平衡状態のランダム場 $O(N)$ モデルには存在しない、非平衡特有のものである。

本論文の最後ではこのモデルを実験的に実現する系として、エアロゲルや多孔質媒質のようなランダムな媒質中を流れるネマチック液晶について議論している。現象論的な考察から、このモデルの示す準長距離秩序相やそれに伴う Kosterlitz-Thouless 転移は、多少の定量的な変更を受けるものの、液晶においても実現され得ると期待される。

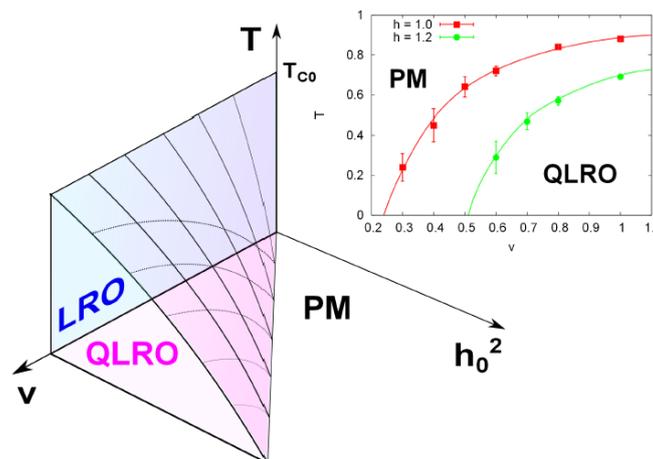


図: 駆動速度 v 、ランダム場の強さ h_0 、温度 T に関する相図。低温で v が大きい領域において準長距離秩序(QLRO)が現れる。 $h_0=0$ の領域はランダム場を含まない $O(N)$ モデルに対応し、低温で長距離秩序(LRO)が存在する。それ以外は無秩序相(PM: 常磁性相)である。

Reference

- [1] A. Onuki, *Phase Transition Dynamics* (Cambridge University Press, 2007).
- [2] A. P. Young ed, *Spin glasses and random fields* (World Scientific, Singapore 1998).

膨潤 SmC*相における C-director の配向相関とダイナミクス

ソフトマター物理学研究室 畑加奈子

Abstract We investigated the swollen effect on the twist distortion elasticity in the chiral smectic phase by dynamic light scattering measurement under reflection scattering geometry, and also its effect on the optical helical pitch by selective reflection measurement. It was found that alkane molecules between the layers prevent the intermolecular interaction.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

スメクチック(Sm)相は一次元の層構造を持つ液晶相の総称であり、秩序構造によりさらに細かく分類される。その中で、SmC*相は層に対して分子が一定角度傾き、さらに C-director(分子長軸の層面への射影)の回転角が連続的に変化してらせん構造を形成している。このような C-director の配向相関は、液晶分子が層間で直接接触し、排除体積相互作用が働くことで伝達される。本論文で注目したのは、直鎖型アルカン分子を溶媒として希釈した膨潤 SmC*相と呼ばれる液晶相である。層間に局在したアルカン分子により隣接層間分子の接触が阻害され、C-director の配向相関は伝達されず、らせん構造が消失することも予想されるが、実際には膨潤 SmC*相でもらせん構造が保持される[1]。そこで本研究では膨潤 SmC*相におけるツイスト弾性定数と粘性係数に着目し、C-director の揺らぎとその分散関係を動的散乱法で研究した。これにより層間分子間の排除体積相互作用における膨潤効果を、C-director の協動的なダイナミクスから直接的に明らかにすることを目的とした。さらに、X線回折による層状構造観測、分光測定によるピッチの観測を行い、層およびらせん構造の膨潤状態との定量的な比較も行った。

まず、SmC*相を示すDIC社の混合SmC*液晶、FT8007にn-tetradecaneを加え、X線回折測定により層間隔の測定を行った。その結果、層間隔の膨潤が確認され、溶媒は層間に局在していることが示された。また分光器を用いた選択反射測定から、可視光域にあるFT8007においてらせんピッチの溶媒濃度・温度依存性を調べた(Fig.1)。この結果、溶媒濃度の上昇に伴いらせんピッチの伸びが観測され、層間に局在したアルカン分子によりC-directorの配向相関が弱められることが示唆された。さらに、動的散乱法によりC-directorの揺らぎの緩和時間を測定し、その散乱角依存性から得られる分散関係の溶媒濃度・温度依存性を明らかにした(Fig.2)。この分散関係を流体力学方程式から予想される関係式、 $\tau^{-1} = B_3(q - q_0)^2 / \eta$ [2]にあてはめ、 B_3/η と q_0 を求めた。結果、アルカン濃度の上昇に伴い B_3/η が低下することを実験的に初めて明らかにした(Fig.3)。層間に局在する直鎖型アルカンは液体であり、粘性係数 η が上昇するとは考えにくく、実験結果は膨潤によるツイスト弾性定数 B_3 の低下を直接的に示すものである。一方、分散関係から得られる極小値 q_0 はらせんピッチの波数であるが、選択反射測定と同様にアルカン濃度の上昇に伴うらせんピッチの伸びが示された。これらの結果から、膨潤SmC*相において層間のアルカン分子は液晶分子の直接衝突を阻害し、層間の配向相関を担う排除体積相互作用を弱体化すると結論できる。

References : [1] 横山液晶微界面プロジェクト 研究終了報告書 No.2(1999-2004)

[2] I. Drevenšek, I. Mušević, and M. Čopič, Phys. Rev. A **41**, 923 (1990)

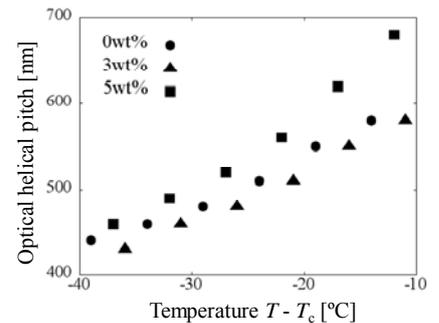


Fig.1 The temperature dependence of optical pitch obtained from selective reflection measurement.

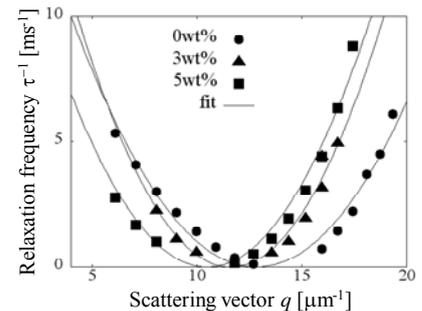


Fig.2 Dispersion relation for the twist mode of C-director fluctuations obtained from the dynamic light scattering (DLS) measurement.

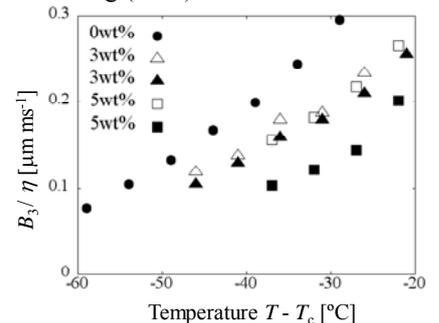


Fig. 3 The temperature dependence of B_3/η .

重力逆二乗則の検証に向けた レーザー冷却 Yb 原子の高感度イオン検出装置の開発

量子光学研究室 高橋功

Abstract We developed new experimental setup of high-accuracy Yb_2 molecular spectroscopy for a test of inverse law of the gravity. Pulse lasers for ionization and a multichannel plate enable us to make high-efficient single atom detection. We observed resonant ionization spectra, and they are assigned as Rydberg states of Yb atoms.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

電磁気力、強い力、弱い力と並び最も基本的な力である重力は、単純な方法では量子論ではくりこみが不可能であるなど、重力を他の力と統一的に理解することは物理学において最重要のテーマの一つとなっている。繰り込み可能性や力の統一という観点から、極端に短い、または長い距離で逆二乗則を人為的に「破たん」させて量子化を実現する理論モデルがさまざま提案されている。このため、重力の逆二乗則の精密検証は、理論モデルの選別という観点からも大きな意義がある。重力の逆二乗則は、宇宙のスケールから研究室での卓上実験のスケールまで、さまざまに行われたが、まだ逆二乗則を否定する結果は報告されていない。

当研究室ではボース凝縮されたイッテルビウム (Yb) 原子を用いて、光会合法により電子基底状態 Yb_2 分子を生成し、その共鳴周波数を精密に測定することで、 Yb_2 の解離限界近傍 (2GHz 程度) で既に kHz 以下の精度で束縛状態を測定してきた [1]。この手法を拡張し、電子基底状態の Yb_2 のすべての束縛エネルギーを精密に測定することを計画している。その結果から電子基底状態の Yb_2 ポテンシャルを再構築し、理論的に得られた電磁気力由来の分子間ポテンシャルと比較してナノメートルオーダーでの重力逆二乗則を破る項を検証することができる。重力の逆二乗則を破る項を kHz の精度で検証できれば、これまでに理論的に提案されたモデルを選別することができる。

しかし我々の採用している光会合法、つまり Yb_2 分子を Yb 原子団から生成する場合は、束縛エネルギーが深くなるにつれて Frank-Condon 因子が小さくなるため、その生成レートは小さくなる [2]。さらに、束縛エネルギーの間隔も広くなる。そのため、先行研究 [1] で行った、光会合の照射による原子ロスの観測から束縛エネルギーを得る手法は、深い準位について未知のエネルギー準位を探索するのにはうまく機能しない。そのため本研究室では、 Yb_2 分子の直接観測をめざし、原子団の高効率イオン検出のための新規実験装置の開発を行った。

イオン検出にはマルチチャンネルプレート (MCP) を用いることとし、MCP を組み込んだ真空装置を新規に設計し、組み立てた。また、磁気光学トラップ (MOT) 用光源として、399nm の外部共振安定型半導体装置、および光強度が不足することから光インジェクションシステムも新規に用意した。現在までに、MOT に捕獲した Yb 原子にナノ秒パルス色素レーザー (波長 400nm 近辺)、およびイオン化用のパルスレーザー (波長 355nm) を同時に照射することで、我々は共鳴的なスペクトラムを観測した。先行研究 [3] から、このスペクトラムはパルス色素レーザー光の 2 光子過程による Yb 原子の Rydberg 状態への遷移に由来するものであり、その状態からのイオン化用パルスレーザーによるイオン化によるものと考えている。時間領域スペクトラムでは、このイオン信号は 1 イオンを検出しているものと考えている。本研究を進展させ、 Yb_2 分子の分光を行うことで、束縛エネルギーの値から、Yb 原子間のポテンシャルを構築する予定である。理論計算によるポテンシャルと比較して重力の逆二乗則の検証を行い、湯川型補正項またはべき型補正項の大きさの上限値を得ることができると考えている。

References

- [1] 菊池悠、修士論文 (2012)
- [2] たとえば、K. Jones et al., Rev. Mod. Phys. 78, 483 (2006)
- [3] P. Camus, et al, J. Phys. B 13, 1073 (1980); M. Aymar et al, J. Phys. B 13 1089 (1980)

二成分液体中のヤヌス粒子の自己駆動運動

相転移動力学研究室 深井新太郎

Abstract We numerically investigate the dynamics of a Janus particle in periodically phase-separating binary. We found a possible mechanism of its self-propelled motion. We also discussed the dependences of the particle mobility on the volume fraction of binary mixtures, frequency of the phase separation and the particle radius.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

これまで、コロイド泳動は非平衡ソフトマター物理の基礎・応用の両面において重要な役割を担い、精力的に研究されてきた。例えば、濃度勾配や温度勾配などの非対称場におけるコロイド粒子の駆動などがその例としてあげられる。近年、科学技術の発展によってヤヌス粒子と呼ばれるコロイド粒子を高い精度で生成することが可能になった。ヤヌス粒子とは粒子の上半球と下半球で物理的、化学的な性質が異なる粒子の事である (Fig. 1.)。本研究では両親媒性の粒子を対象とした。ヤヌス粒子はその非対称性から、通常のコロイド粒子にはない性質を持つ。その一つが、粒子が自ら方向を決めて運動する自己駆動運動である [1]。このような運動は、ヤヌス粒子のもつ非対称性により一様な場が乱されることによって生じる。

本研究では、一様な場におけるヤヌス粒子の非対称性が引き起こすダイナミクスを理解する事を目的とした。特に、二成分液体中にヤヌス粒子一粒子を入れた系を調べた。温度を一定間隔で一様に上げ下げする状況下でのヤヌス粒子の挙動を解析した。つまり、相分離をサイクリックに引き起こした際のヤヌス粒子の時間発展を追った。

手法として本研究では数値シミュレーションを用いた。コロイド粒子のシミュレーションにおいて流体力学的な効果を正しく取り入れることは難しい。立方格子上ではコロイドの境界条件を正確にとり扱う事ができないからである。本研究では、流体力学的な効果を取り入れる為、粒子を粘性の高い流体粒子として扱う流体粒子ダイナミクス法 [2] を用いた。

相分離を繰り返し引き起こす事によって、ヤヌス粒子が粒子の方向に向かって自己駆動運動することを見いだした [3]。この運動には、粒子の非対称性と流体力学的な効果が寄与している。また、二成分液体の体積分率依存性を調べたところ、自己駆動の機構や効率が体積分率によって異なることがわかった。また、温度の上げ下げの時間間隔を変化させる事で、効率のより時間間隔を考察した。本研究で扱ったヤヌス粒子は実験的に扱える粒子よりも小さい。そのため、粒子の半径を変化させ、その粒径依存性も調べた。

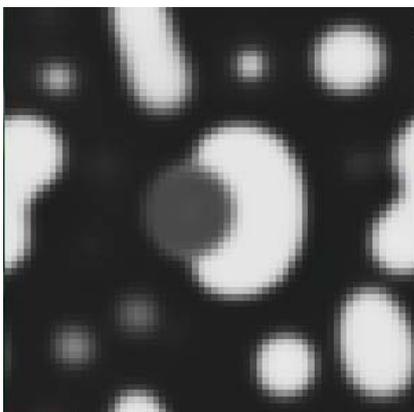


Fig. 1. A Janus particle in a phase-separating binary mixtures. The Gray circle at the center is the Janus particle. Phase separation occurs around the particle. The black and white colors represent the volume fraction of the binary mixture. The white phase tends to wet the tail of the Janus particle and its volume fraction is 30%. During the phase separation, the particle moves toward the particle head (left side in this figure).

References

- [1] Hong-Ren Jiang *et al*, Phys. Rev. Lett. **105**, 268302 (2010).
- [2] Hajime Tanaka and Takeaki Araki, Phys Rev. Lett. **85**, 1338 (2000).
- [3] Takeaki Araki and Shintaro Fukai, *submitted*

剪断流中における単一気泡の重力下での運動の解析

流体物理学研究室 秋田峻佑

Abstract We conducted a two-dimensional numerical simulation of a buoyancy-driven bubble in a shear flow with a lattice Boltzmann method. We found a transition of the horizontal moving direction even in the simpler two-dimensional system with the transition radius smaller than that observed in the experiment. ©2015 Department of Physics, Kyoto University

複数の気泡を含むパイプ内の流れは、気体成分の供給量に依存して気泡同士の合一や気泡周りの流れによる相互作用などが変化する。したがってその振る舞いを定量的に理解することは難しいものの、定性的な特徴はよく知られている。気泡の供給量が少ないときは気泡径の分散が小さいバブル流となる。さらに供給量が増加するにつれて気泡同士が合体し、形成された砲弾型の大きな気泡がパイプ中央を、その背後及び周辺に小さな気泡が存在するスラグ流となる。気泡の水平方向の移動により合一がさらに促進されるが、その運動には気泡に発生する揚力が大きな役割を果たしている。

揚力についての考察として、静止した液体中を浮力により単一の気泡が上昇する系を考える。この系では気泡に生じる力は浮力と進行方向逆向きに加わる抗力のみであり、揚力は生じない。しかし、剪断流中(容器の右側壁を静止、左側壁を上向きに駆動)では、気泡はさらに進行方向に垂直に揚力を受けることが知られている。この揚力による水平方向の気泡の移動は transverse migration と呼ばれ、気泡流の発達の前過程としてこれまで実験及び数値計算により詳しく調べられてきた。

弱い剪断流中の球に加わる揚力は、Zun(1980)、Auton(1987)、Drew and Lahey(1987) が非粘性流の仮定の下で近似的に計算した。この結果、球の半径によらず駆動壁方向への揚力が発生することが明らかになった。他方、Tomiyama *et al.*(2002) の実験では、剪断流中での単一気泡の軌道が計測された。この実験では小さな径の気泡では理論と整合する結果が得られたものの、径が大きな場合は駆動壁方向逆向きに移動する結果が得られた。つまり、水平方向の運動の向きには転移が存在することが示唆される。

本研究では格子ボルツマン法(Inamuro(2001))による数値計算を行い、2次元において浮力により上昇する気泡の剪断流中での運動、特に migration の方向の転移を調べた。ここで密度比は5とし、1成分2相系の van der Waals 流体を仮定している。Tomiyama *et al.*(2002) ではモートン数(Mo)、エトベス数(Eo)、剪断率(Sr)の3つのパラメータにより結果を整理しており、本研究もそれを踏襲し、これらを変化させ計算を行った。ここでエトベス数とは気泡の直径に関する無次元数であり、 $Eo = \frac{g\Delta\rho D^2}{\sigma}$ である。ただし g は重力加速度、 $\Delta\rho$ は密度差、 D は気泡の水平方向の長さ、 σ は表面張力係数である。

我々の数値計算結果より、大幅に単純化した2次元の系においても migration の方向の転移点が存在することが判明し、その転移エトベス数は3次元の系に比べ小さいことがわかった。また我々の結果では気泡の後流にカルマン渦列や双子渦の様な渦構造は確認されなかった。以上より、transverse migration の方向選択には気泡の変形が本質的であると予想される。

References

- [1] TR. Auton, *J. Fluid Mech.*, **183**, 199-218 (1987)
- [2] D. A. Drew and R. T. Rahey JR., *Int. J. Multiphase Flow*, **13**(1), 113-121 (1987)
- [3] T. Inamuro, *物性研究*, **77**(2), 197-232 (2001)
- [4] A. Tomiyama *et al.*, *Chem. Eng. Sci.*, **57**, 1849-1858 (2002)
- [5] I. Zun, *Int. J. Multiphase Flow*, **6**(6), 583-588 (1980)

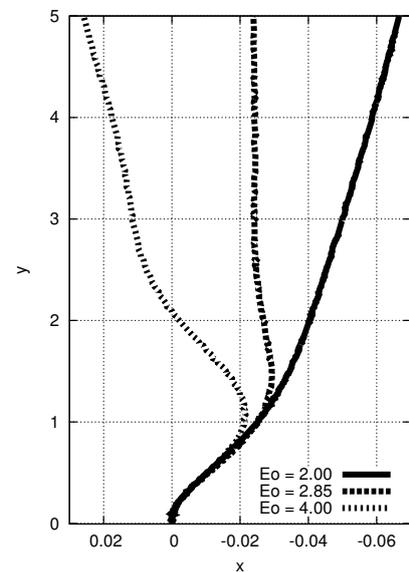


Fig.1 Three trajectories of the center of mass of a bubble for three Eo numbers. The coordinates are normalized with the width of the channel. Normalized diameters of bubble are about 0.12. The moving and stationary walls are located at $x = 0.5$ and at $x = -0.5$, respectively.

^{77}Se -NMR を用いた鉄系超伝導体 FeSe の ゆらぎと超伝導の研究

固体量子物性研究室 新井健司

Abstract We studied magnetic fluctuations on a Fe-based superconductor FeSe from the ^{77}Se -NMR measurement. In FeSe, antiferromagnetic fluctuations start to develop below the structural transition, and the relationship between structural and magnetic transitions is different from that in other Fe-based superconductors. We found a pseudogap behavior above superconducting transition in FeSe.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

鉄系超伝導体では、構造・磁性・超伝導の関係に興味を持たれている。鉄系の代表的な系である $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{As}_2$ の母物質 BaFe_2As_2 では、高温から構造と反強磁性ゆらぎが同時に発達し、正方晶から斜方晶に構造転移を起こすと同時に遍歴反強磁性転移をする。この BaFe_2As_2 において Fe を Co 置換することにより構造・磁性転移が抑制され、構造と反強磁性ゆらぎが低温まで発達し超伝導を示すようになる (Fig.1)。超伝導転移温度直上まで構造と反強磁性ゆらぎが同時に発達しているため、超伝導の発現にはどちらのゆらぎが重要なのか同定出来ていなかった。

一方、今回我々が注目する FeSe は、Fe と Se からなる層が積み重なった、鉄系超伝導体の中で最も簡単な結晶構造を持つ (Fig.2)。この FeSe は、 $T \sim 87\text{ K}$ において BaFe_2As_2 と同様な構造転移が起こすが、反強磁性転移は示さず、 $T_c \sim 8\text{ K}$ で超伝導を示すようになる [1]。このように FeSe では、構造・磁性・超伝導の関係が $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{As}_2$ などの他の鉄系超伝導体と異なっている。したがって、FeSe と $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{As}_2$ 系の実験結果を比較することにより、鉄系超伝導の超伝導発現機構に関する重要な手がかりが得られるものと期待できる。

我々は、カールスルーエ工科大学の Wolf 教授、Meingast 教授のグループより FeSe の良質な単結晶の提供を受け、 ^{77}Se -NMR を用いて FeSe における構造・磁性・超伝導の関係について調べた。我々は構造転移に伴い Se-NMR の信号がわずかに分裂し、電子軌道の秩序を検出した。また、FeSe では構造転移以下で反強磁性ゆらぎが発達することを明らかにした [4]。これは磁気ゆらぎが構造転移を引き起こしていると考えられている $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{As}_2$ の系とは大きく異なる。また FeSe では、超伝導転移を起こす直前には反強磁性ゆらぎのみが存在することから、反強磁性ゆらぎが超伝導に重要な役割をしていると考えられる。

さらに我々は、FeSe のスピン格子緩和率 $1/T_1$ の測定から、 T_c 以上の温度から反強磁性ゆらぎが抑制される擬ギャップ的振舞いを観測した。擬ギャップは、強相関超伝導の本質的な物理現象として注目されている現象である。FeSe に見られた擬ギャップの振舞いと銅酸化物高温超伝導体の振舞いと比較することで、擬ギャップの起源について議論する。

References

- [1] F. C. Hsu, *et al.* Proc Natl. Acad. Sci USA (2008) 14262
- [2] J. H. Chu *et al.* Phys Rev. B **79**, 014506 (2009)
- [3] M. Rotter *et al.*, Phys. Rev. B. **78** 020503 (2008)
- [4] A. E. Bohmer and T. Arai *et al.*, To appear in Phys. Rev. Lett

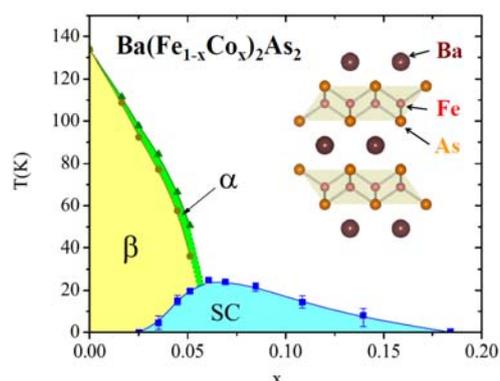


Fig. 1: Phase diagram of $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$

[2]. α phase: Orthorhombic paramagnet

β phase: Orthorhombic

Antiferromagnet

Inset: Crystal structure of BaFe_2As_2 [3].

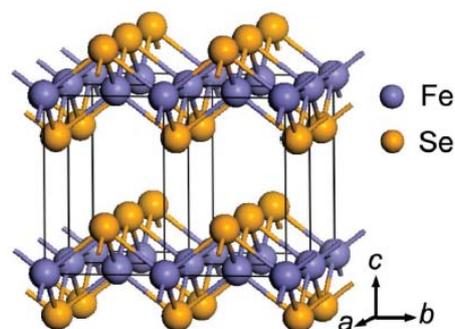


Fig. 2: Crystal structure of FeSe [1].

非弾性 X 線散乱による液体 Si のプラズモン測定

不規則系物理学研究室 石黒陽太郎

Abstract We measured inelastic X-ray scattering from solid and liquid Si to determine the plasmon dispersions. Difference in plasmon energy between solid and liquid state is consistent with the change of the electron density. At $Q = 0$, plasmon linewidth in solid state was 50% larger than that in liquid state.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

Si は固体では半導体であるが融解に伴って電気伝導度が不連続的に増大し金属に転移する。しかしその配位数は 6~7 と Al などの単純液体金属の配位数 10~12 と比べ小さく、この比較的隙間の多い構造が液体 Si における共有結合性を示唆してきた。第一原理分子動力学計算[1]によって液体 Si 中での寿命の短い共有結合の形成が示唆される一方で、X 線発光分光測定やホール係数測定からは液体 Si の価電子が自由電子ガス (FEG) モデルによって良く記述されるという結果が得られている。このように液体 Si は共有結合性と自由電子的振る舞いの両面が観測される非常に興味深い特殊な金属である。

本研究では液体 Si のプラズモン励起を観測した。金属内の伝導電子は X 線のエネルギーを得てプラズマ振動という集団的な励起をおこすが、プラズモンとはこのプラズマ振動の量子である。一般的にプラズモン励起エネルギー ($\hbar\omega_p$) はバンド間遷移にかかるエネルギー値に比べ大きな値をとるため、プラズモンは絶縁体や半導体にも良く定義された励起である。またプラズモンはイオンの影響を受け崩壊するが、その寿命は $\hbar\omega_p$ ピーク線幅に現れる。これらのパラメータは電子密度や金属的性質を反映するため、これらの実験値と FEG モデルや単純金属との差異を調べることで前述の特異な液体 Si の電子状態の解明に繋げることが出来る。しかし Si の高い融点により実験方法が限られ、また高強度高分解能の X 線装置が必要となるため、放射光を用いて非弾性 X 線散乱実験を行った。

Fig.1 に示すのは $\hbar\omega_p$ を運動量移行 Q の二乗についてプロットした分散関係である。固液での $\hbar\omega_p$ の差は融解による密度増大に矛盾しない。Fig.2 に示すのはプラズモン線幅を同じく Q^2 についてプロットしたものである。液体では単調に変化するのに対し、固体では低 Q 側で一定値に収束する傾向が見られた。また $Q=1.4\sim 1.5 \text{ \AA}^{-1}$ 近傍で固液での線幅の大小が逆転している。同じく固体である室温においてもこれらと同様の傾向が見られた。また $Q=0$ に外挿した結果、固体では液体に比べ約 50% 大きな値をとった。固体の線幅については先行研究との比較、また液体については Kimura らの計算式[2]を用いて計算し比較した。その詳細についても報告する。

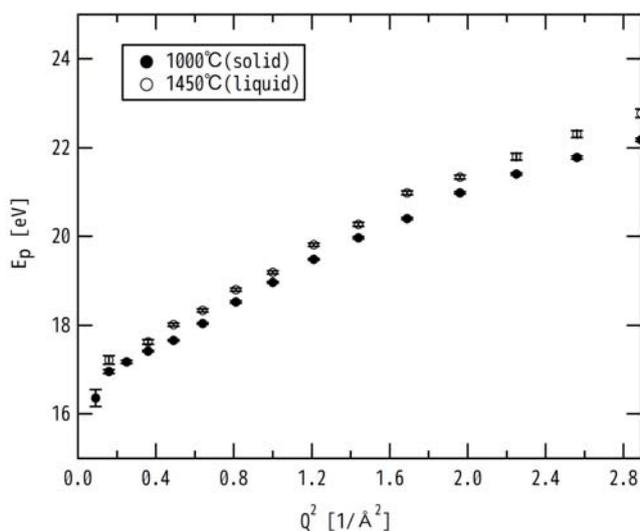


Fig. 1. Plasmon dispersions in solid and liquid Si.

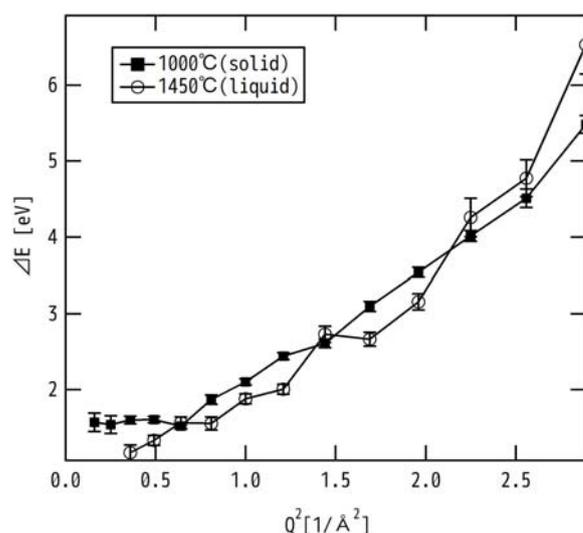


Fig. 2. Plasmon linewidth in solid and liquid Si.

- References** [1] I. Štich, R. Car, M. Parrinello, Phys. Rev. Lett., **63**, 2240 (1979)
[2] K. Kimura, K. Matsuda, M. Yao, J. Phys. Soc. Jpn., **82**, 115001 (2013)

コーヒーの湯気： 熱水表面に浮遊する湯気とその集団消滅現象

時空間秩序・生命物理研究室 梅木崇浩

Abstract There are white membranes of steam on the surface of the hot water. While the membranes whiffle due to air flow of rising steam, peculiarly fast splitting events occasionally run through. We looked into this phenomenon using a microscope with a high speed video camera, and found intriguing details.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

カップにコーヒーや紅茶を注ぎ太陽光などの強い光にかざすと、上方に巻き上げられる湯気とは別に、水面に張り付き白い膜になっている湯気が存在することに気付く。その白い膜は非常に安定に見えるが、時折亀裂が入り、その一部が数mm程度の幅で突然消え、時に奇妙なパターンを見せる。この現象の解明を目指して実験を行った。

まず、水面上の湯気の同定を試み、図1の様なセットアップで湯気を観察した。水槽に熱湯を入れその熱湯の水面上の湯気を上方からライトで照らし、それによってできた湯気の回折像を水槽の下方からマクロレンズとカメラで撮影する(図1)。その結果、水面上の膜のように見えるものは、

10 μm 程度の大きさの微小水滴(湯気)の集団が10 μm オーダーの高さで水面から離れて浮遊しているものであるということが明らかになった。図2では3つの異なる温度(62.5°C、73°C、78°C)における水面直上の水滴を示している。この図に映っている黒い粒子が微小水滴であり、図からも分かるように水滴の大きさは水温に依存し、温度が高くなればなるほど水滴の大きさが大きくなるという実験結果が得られた。このとき、ビデオレート以下の短い時間に水滴が集団で消える現象が確認された。

次に、ハイスピードカメラを用い、集団での水滴消滅をさらに詳しく実験・観察した。図3の右上にみられる円弧状のものが集団消滅現象の境界である。この画像では時間が経つにつれてその境界が進行している様子が示されている。この集団消滅現象の伝搬の速度(境界が移動する速度)を、これらの映像から求めると1.0~2.0m/sであった。これは、ビデオフレーム1コマで数cmに相当する事から、最初に挙げた湯気の膜にできる亀裂の生成と同等の速度と言える。

ここで、水の表面波について調べると、波の波長を約100 μm とした場合の速度が約1.5mであることが計算結果として得られる。波長は、同時に観察された波に見える影の間隔から見積もった。このことから、水滴の集団消滅現象が表面波によって起こるものとの仮説が立てられる。湯気の集団の中にある一個もしくは複数個の水滴が何らかの原因により水面に落下し、それにより表面波が発生し、そしてその表面波が周囲にある水滴を飲み込みながら進行することによって集団消滅現象が起こるというモデルで考察した。

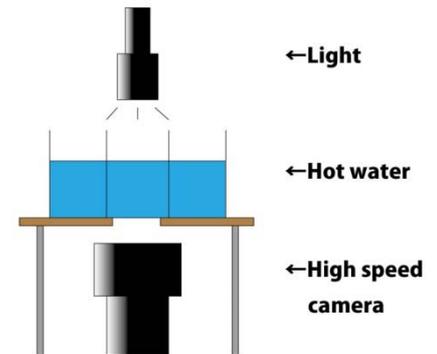


Fig.1 Experimental set up

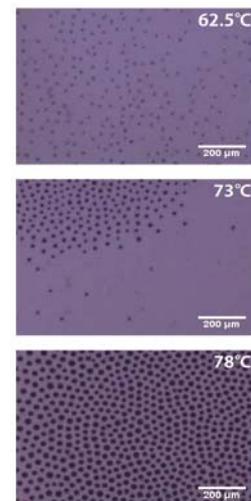


Fig.2 Microscope images of the hot-water surface at the temperatures $T = 62.5, 73, \text{ and } 78^\circ\text{C}$

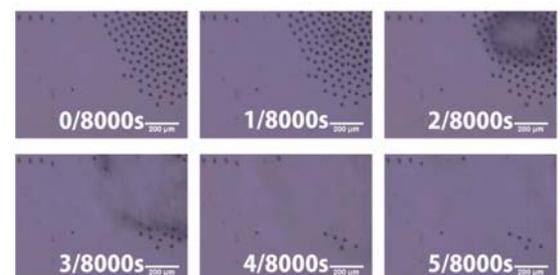


Fig.3 Wave front propagation of a collective vanishing event

長距離相互作用のある一次元フェルミオン模型のダイナミクス

物性基礎論:凝縮系物理研究室 太田卓見

Abstract We analyze a one-dimensional fermion model with long-ranged interactions in order to understand topological and dynamical properties of the system. First, we determine the topological phase diagram of the model by calculating the topological invariant and the entanglement spectrum. Second, we investigate dynamical properties under the sweep of interactions.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

近年、トポロジカル相と呼ばれる相が発見され、注目されている[1]。その相は Ginzburg-Landau 流の局所的な秩序パラメータによっては特徴付けられず、エンタングルメントのような非局所的な量によって特徴付けられることが分かってきた[2]。Kitaev によって提案されたスピinless p 波超伝導体 (Kitaev 模型) [3]のように、一次元量子系においてトポロジカル相を示す模型の研究は盛んに行われている。Kitaev 模型において、ゼロエネルギーの Majorana モードが存在するような相がトポロジカル相と呼ばれる。その Majorana モードの数は系のエネルギーギャップが閉じるまで一定である。相互作用の形を変えると、トポロジカルに異なる相が存在しうる。理論的な興味だけではなく、実際の量子細線の実験では長距離の相互作用が存在するため、これらの効果を考えることは重要である。

また、トポロジカル相におけるダイナミクスも注目を集めている。臨界点を通過するように系の相互作用を時間的に変化 (スウィープ) させると、臨界点において緩和時間が発散するので、終状態には励起状態が有限の確率密度だけ存在する。励起状態のエンタングルメントはあまり知られていないため、その状態は基底状態とは異なるエンタングルメントの性質を持つことが期待される[4]。

本研究では、長距離相互作用の効果とダイナミクスを調べるために、次近接相互作用を加えた Kitaev 模型を数値的に解析する。具体的には、厳密対角化と infinite Time Evolving Block Decimation (iTEBD) の方法を用い、エンタングルメントスペクトル、エンタングルメントエントロピー、そして相関関数の時間依存性と距離依存性を計算する。まず、トポロジカルな寄与を与える相互作用が存在するときの相図を決定し、それらの相をエンタングルメントスペクトルとトポロジカル不変量で特徴づける。次に、臨界点を通過するように系の相互作用をスウィープさせ、系の時間発展を調べる。スウィープの速度を変えると、エンタングルメントスペクトルと、トポロジカル相を特徴付ける非局所的なストリング相関関数の時間と距離依存性が変化する。比較的ゆっくりとしたスウィープを行うと、ストリング相関関数とエンタングルメントエントロピーの距離依存性に周期的な構造が現れる。この構造の原因は臨界点近傍で励起された低エネルギーの Bogoliubov 準粒子であることが分かった。また、トポロジカル相におけるダイナミクスを調べるために、系の端に局在する Majorana ゼロモードの時間発展に注目する。スウィープすることにより、そのモードはバルクのモードと結合し、コヒーレンスを失うことが予想される。しかしながら、スウィープ時間や変化させる相互作用の種類がどのように影響するかはよく分かっていない。エンタングルメントスペクトルとストリング相関関数を調べることで、これらの影響を調べる。

References

- [1] X. G. Wen, *Quantum Field Theory of Many-Body Systems*, (Oxford University Press, New York, 2004)
- [2] H. Li and M. Haldane, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 010504 (2008)
- [3] A. Y. Kitaev, *Physics-Usp.* **44**, 131 (2001)
- [4] E. Canovi, E. Ercolessi, P. Naldesi, L. Taddia, and D. Vodola, *Phys. Rev. B* **89**, 104303 (2014)

自己励起過程の自発的なバースト現象

非線形動力学研究室 翁長朝功

Abstract

Self-exciting point processes describe the manner in which every event facilitates additional events, as in the case of epidemics. By increasing excitability, the event occurrences start to exhibit bursts even without external stimuli. We revealed that the transition is determined by the average number of events added by a single event, $1-1/\sqrt{2} \approx 0.3$.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

感染症の拡がりや人間の社会活動、脳内の神経活動においては、ある事象の発生が次の事象の発生を促し、事象が伝播していく。このような系では発生頻度が瞬間的に大きく揺らぐ現象が発生し、この現象をバーストと呼ぶ。これらの系で観測されるバースト現象を、外部からの刺激により引き起こされる外発的バーストと、外部からの刺激なしに自発的に発生する内発的バーストの2種類に大別する研究がある [1]。神経活動に関する近年の研究では、内発的な揺らぎを伴った神経回路網が作業記憶、運動制御および刺激の表現という点で応用可能性を持つことが示され、近年理論が進展している [2, 3]。

事象の発生が後続の事象の発生を促すような系においては、内部の結合を強くすることで内部活動が内発的バーストを伴う状態に移行する [2, 4]。本研究で我々は、この転移がネットワークの内部パラメータにどのように依存するかを定量的に分析した。

観測によってバーストが検出できる限界について原理的な頻度推定法 [5] を用いて解析できる。内発的バーストが観測されるシンプルなモデルとして、時刻 t における発生頻度が式 (1) で表される Hawkes process [6] についてこの解析を行った。

$$\lambda(t) = \rho + \alpha \sum_k f(t - t_k) \quad (1)$$

ここで、 $\lambda(t)$ は時刻 t での事象の発生頻度、 ρ は基底頻度、 t_k は k 番目の事象の発生時刻、および α はある単一事象が未来に引き起こす事象数の期待値である。

本研究で、Hawkes process では内発的バーストが観測不可能な状態から観測可能な状態になる転移が存在し、この転移は相互作用を表す関数 f の形に依存せず、対象によらない一定した条件 $\alpha > \alpha_c = 1 - 1/\sqrt{2} \approx 0.2929$ になることを発見した (Fig. 1)。そして、ネットワークの上で相互作用しあう多次元の Hawkes process に拡張し、結合の構造および各結合の上での相互作用の強さの分布がバースト現象にどのように影響するかという議論を展開した。

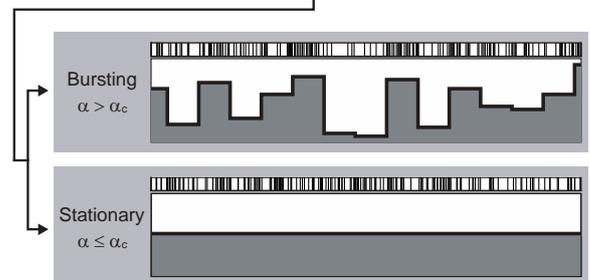
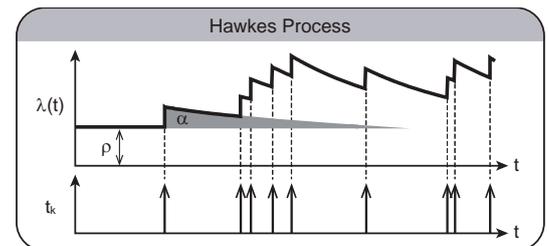


Fig. 1 **Hawkes process.** (top) The rate of event occurrence is modulated according to generated events. (bottom) Event sequences depicted in rasters may exhibit non-stationary bursts or remain stationary, depending on whether the excitability α is larger or smaller than a critical value α_c , respectively.

References

- [1] D. Sornette *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93**, 228701 (2004).
- [2] S. Ostojic, Nat. Neurosci. **17**, 594-600 (2014).
- [3] D. Sussilo and L.F. Abbott, Neuron **63**, 544-557 (2009).
- [4] T. Onaga and S. Shinomoto, Phys. Rev. E **89**, 042817 (2014).
- [5] S. Koyama, S. Shinomoto, J. Phys. A: Math. Gen. **37**, 7255-7265 (2004).
- [6] A.G. Hawkes, Biometrika **58**, 83-90 (1971).

多孔質ガラス中での超流動ヘリウム3

低温物理学研究室 木崎泰英

Abstract We study superfluid helium 3 in nanoporous media. Pore size is comparable to coherence length of superfluid helium 3. We hope to stabilize exotic superfluid phases in randomly networked nanopores.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

超流動ヘリウム3は、不純物のない非常にクリーンな物理系を作ることができ、理想的な量子多体系として、盛んに研究されている。Bulk での超流動ヘリウム3の物性は理論・実験の両面で理解が進んでいるが、ヘリウム3のコヒーレンス長程度の制限空間による物性への影響は今後の研究が期待されている。一方、ヘリウム4における超流動への制限空間の影響は実験されており、 λ 転移温度の変化やねじれ振動子による超流動流の測定から、局所的なボース・アインシュタイン凝縮の存在が示唆される結果が報告された。しかし、ヘリウム3のコヒーレンス長は20~100nmと長く、それに適した細孔径を持つ媒体を準備することが困難で、ほとんど実験なされていなかった。

今回の実験で用いた SPG という多孔質ガラス媒体は、ヘリウム3のコヒーレンス長に近い100nm程度の径を持つ細孔が複雑なネットワーク構造を形成している。この媒体中にヘリウム3を閉じ込めると、以下のような制限空間による影響が期待される。まず、コヒーレンス長程度のサイズの空間に閉じ込めることにより、クーパー対を構成する準粒子が壁面と衝突することで対が破壊されるため、転移温度の低下や対称性の異なる超流動相の出現が期待される。さらに、壁面の表面状態が反映された境界条件による、散乱を通じた超流動相への影響である。壁面にて粒子が鏡面的に反射される場合(specular)では、壁面にて平行な運動量成分を持つ準粒子は壁との衝突でも運動量は変化しないため、クーパー対は破壊されない。対して拡散的な反射をする場合(diffusive)は、すべての運動量方向に影響する。よって、SPG内の表面状態によって、転移温度や超流動相の変化が期待される。最後の一つは、ランダムネットワーク構造の効果である。ネットワーク中の任意の経路を一周したとき、秩序変数の位相の変化には、 2π の整数倍という制限が存在する。この条件の整合性をとるため、SPG中に秩序変数が急激に変化せざるを得ず、秩序がつぶれたノーマルな部分が形成される可能性がある。このことによりマクロなコヒーレンスを持たない局在化されたクーパー対の存在が期待されることとなる。

本実験では、SPG中の表面状態を変化させるため、ヘリウム4コートという手法を用いた。ヘリウム4コートは、ヘリウム4のみを先にサンプルセルに導入し、数層のみ表面に吸着させる方法である。このヘリウム4コートを2.5層分行うことで、specularな壁面が達成されていると期待した。100nmの細孔径をもつSPGのセルを用いた先行実験では、ヘリウム4コートした場合とヘリウム4コートしなかった場合との二つの条件で行われた。後者の条件でのスピン拡散係数の測定から、細孔内に適切な試料空間が確保されている反面、試料空間にBulkのヘリウム3が混入していると思われる結果が得られた。またNMRスペクトルによる超流動転移温度の測定では、ヘリウム4コートした場合にはBulkと一致し、ヘリウム4コートしなかった場合にはBulkより高い転移温度が観測された。先行研究のそれらの結果を踏まえた上で、ヘリウム4コートした場合の拡散係数を解析したところ、Bulkの数倍の拡散係数を持つ信号成分が観測された。また、極低温から室温に戻したサンプルセルを確認したところ、SPG中に熱収縮が原因と思われるヒビや、試料空間にBulkのヘリウム3が混入しうる大きな気泡が確認された。これは、Bulkの信号が混ざっているらしき測定結果の原因だと思われる。これを受けて新しいサンプルセルを設計した。SPGは細孔径は300nmであり、熱収縮によるSPGへの圧迫や、気泡の混入を防ぎ、NMR測定においてBulk信号が混入しないという方針の下に作成した。ヘリウム4コートを行わずにNMR測定を行ったところ、SPG中の磁性不純物の影響を受けた線幅の広いスペクトルが観測され、Bulkの信号は十分除去されていることが確認された。

球面上の自己駆動粒子系の数値解析

非平衡物理学研究室 金 泰燁

Abstract We numerically simulate the Vicsek model on a sphere to study effect of the boundary condition on the phase transition. We find a dynamically changing band structure in the sphere system, while the band only moves without changing its structure in the plane system with the periodic boundary condition.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

鳥や魚そして人間に至るまで、生物は絶え間なく動いて周辺と相互作用する。数千、数万単位の個体が集団を形成したときの運動は興味深い。リーダーのいない生物集団は、蚊のように無秩序な群れを成す場合もあるが、渡り鳥のトモエガモは、20 万以上の個体がまるで一つの生物のように群舞する (Fig. 1)。トモエガモや小魚のように、自分で動き、リーダーがなくても秩序のある運動をする生物集団のモデルである Vicsek モデル [1] について研究を行った。

Vicsek モデルでは、ノイズの大きさを変えると秩序相から無秩序相へと相転移が見られる。Vicsek らがこれを連続転移と考えたのに対し、Chaté ら [2] は不連続転移だと主張した。彼らは周期境界の平面上で数値実験を行っており、相転移の近傍で系全体に渡る長い帯構造が出現することも見出している。帯は系のサイズがある程度以上の系だけで観測されており、不連続転移も同様に大きな系でのみ観測される。したがって、帯は不連続転移と深く関係があると予測される。また、帯には方向性があり必ず境界に沿った方向に出ることから、境界条件の影響を強く受けていると考えられる [3, 4]。

本研究では帯構造と相転移の境界依存性を詳しく調べるために、特別な方向のない球面上での Vicsek モデルの数値計算を行った。その結果、この場合でも帯は存在し、全域的な秩序変数は周期境界の場合と同じような振る舞いをするを見出した。したがって、帯の形成は閉じた境界を持つ自己駆動粒子系で一般的な現象であり、相転移の不連続性は閉じた境界の自己駆動粒子系では系自体が持つ性質であると考えられる。しかし、周期境界では帯は境界面に沿った方向に移動するだけで構造自体はほぼ変化が無いが、球面上の系では、粒子が球面の一つの極に集まったのち、均等に広がる帯を形成しながら反対側の極にまた集まるということを繰り返す動的に変化する構造を示す。この差異により、局所密度や局所秩序変数の分布に違いが現れる。周期境界における局所秩序変数の分布は、帯が出ている状態でもピークは一つであるが、球面上の場合は二つのピークが現れる (Fig. 2)。この他にも、局所密度と局所秩序変数の相関を測定することで、球面と周期境界の振る舞いの違いを明らかにすることができた。



Fig. 1. Flock of 200 thousands birds, *Anas Formosa* (also called Tomoe-gamo) as an example of self-propelled particles. Photo provided by the courtesy of Young-gee Joo.

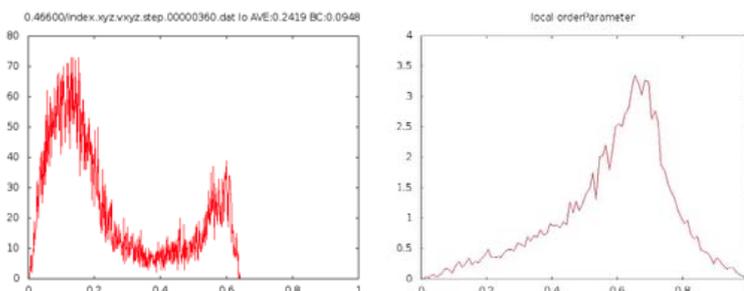


Fig. 2. Distributions of the local order parameters in the sphere system (left) and in the plane system with the periodic boundary condition (right).

References

- [1] T. Vicsek, A. Czirók, E. Ben-Jacob, I. Cohen, and O. Shochett, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 1226 (1995).
- [2] H. Chaté, F. Ginelli, G. Grégoire, and F. Raynaud, *Phys. Rev.* **E77**, 046113 (2008).
- [3] M. Nagy, I. Daruka, and T. Vicsek, *Physica A* **373**, 445-454 (2007).
- [4] M. Aldana, H. Larralde, and B. Vázquez, *Int. J. Mod. Phys.* **B23**, 3661-3685 (2009).

磁場侵入長の精密測定による LaFeAsO_{1-y} 及び 関連物質の超伝導ギャップ構造の研究

固体電子物性研究室 蔵田聡信

Abstract We study doping dependence of the superconducting gap structure in single crystals of LaFeAsO_{1-y} by magnetic penetration depth measurements. The results show that the superconducting gap has nodes in underdoped samples and an optimally-doped sample. In contrast, a fully gapped state is realized in an overdoped sample.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

鉄系超伝導体は結晶構造ごとに分類され、主に BaFe_2As_2 系 (122 系) 鉄系超伝導体において単結晶試料を用いた超伝導ギャップ構造に対する系統的な実験が数多くなされている。一方鉄系超伝導体において現在最も高い超伝導転移温度 (T_c) を持つ物質を含む LnFeAsO_{1-y} 系 (1111 系) では単結晶試料を用いた超伝導ギャップ構造の系統的な実験はなされていない。

鉄系超伝導体は同じ結晶構造を持つ系においてもノードを持つものや、フルギャップのものなど異なる超伝導ギャップ構造が実現していることが様々な実験から明らかになっている。従って超伝導発現機構を理解するためには何が超伝導ギャップ構造を決定しているのかを調べるのが非常に重要である。

様々な系での磁場侵入長測定から、鉄系超伝導体では鉄の正方格子面からのニクトゲン原子の高さ (h_{pn}) が 1.33 \AA よりも小さければノードを持ち、それよりも大きければフルギャップとなることが提案されている[1]。そのため h_{pn} が超伝導ギャップ構造にとって重要なパラメータであることが指摘されている[2]。

1111 系鉄系超伝導体 LaFeAsO_{1-y} は、ドーパ量を変化させることで h_{pn} が 1.33 \AA 付近で変化する[3]。そこで我々はドーパ量の異なる LaFeAsO_{1-y} 単結晶試料に対する磁場侵入長測定を行い h_{pn} の変化が超伝導ギャップ構造に与える影響を調べた。

我々は LaFeAsO_{1-y} のアンダードーパ (UD1, UD2)、最適ドーパ (OPT)、オーバードーパ (OVD) 各試料において、磁場侵入長測定を 500 mK の温度領域まで行い、磁場侵入長の変化量 ($\Delta\lambda$) の温度依存性を調べた (Fig. 1)。その結果、磁場侵入長は $T/T_c < 0.2$ の温度領域で、最適ドーパ、アンダードーパ試料に対してべき乗の温度依存性 $\Delta\lambda \propto T^n$ ($n < 2$) を示し、一方でオーバードーパ試料に対して低温で一定となる熱活性型の温度依存性を示した。このことは最適ドーパ、アンダードーパ領域では超伝導ギャップ構造がノードを持つことを示し、一方でオーバードーパ領域では超伝導ギャップ構造がフルギャップであることを示す。

講演では磁場侵入長の温度依存性の詳細について報告し、超伝導ギャップ構造のドーピング依存性について議論する。

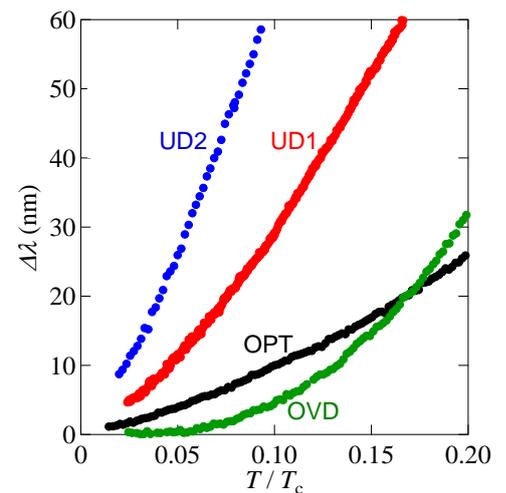


Fig. 1. Low-temperature change in the magnetic penetration depth in LaFeAsO_{1-y} . UD1, UD2, OPT, and OVD correspond to an underdoped sample with $T_c=25 \text{ K}$, an underdoped sample with $T_c=26.5 \text{ K}$, an optimally-doped sample with $T_c=28 \text{ K}$, and an overdoped sample with $T_c=19 \text{ K}$, respectively.

References

- [1] K. Hashimoto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 047003 (2012).
- [2] K. Kuroki *et al.*, Phys. Rev. B **79**, 224511 (2009).
- [3] C. Lee *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 083704 (2008).

ニューラルネットワークの結合推定に必要な スパイク列の時間長さ

非線形動力学研究室 栗田修平

Abstract Neural networks are characterized by their interconnections, which are inferred from the spike trains of neurons obtained in the activity recording experiments in neuroscience. Here we estimate the minimal time length of spike trains to infer the connections between neurons. This gives the required measurement time of such experiments.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

ニューラルネットワークでは、多数の素子が相互に結合し、信号を伝え合うことで情報処理を行っている。とりわけ神経科学では、生物の脳において信号を伝達する素子である神経細胞またはニューロンが、どのように結合しネットワークを構成しているのかを調べるのが重要な課題である [1]。しかし、多数のニューロン間の結合の有無を、実験により直接に測定することは容易ではない。それゆえ、多数のニューロンの活動を計測し、得られた活動計測データから背後に潜む結合を推定するという手法が取られてきた [2]。ニューロンの活動は、一般に、スパイクもしくは発火と呼ばれるパルス状の電気信号として測定される。近年、このようなスパイク測定実験にて技術的な進展があり、多数のニューロンから従来より長時間のスパイク列を得ることができるようになってきた。しかしながら、ニューロン間の結合推定を行うには、どれほどの時間長さのスパイク列が必要であるかは、これまで研究されてこなかった。本研究では結合推定を行う際に必要となる最小のスパイク列の時間長さ T を示す。

まず、発火レート λ_1, λ_2 を持つニューロン 1 とニューロン 2 を取り出して、ニューロン 2 からニューロン 1 への結合の有無を推定する場合を考える。ここでシナプス前ニューロンの単一のスパイクがシナプス後ニューロンにおいて引き起こす平均のスパイク数である Δn を導入した。必要な最小のスパイク列長さ T は Δn を用いて

$$T \sim \frac{\tau_s^2 \lambda_1}{(\Delta n)^2 \lambda_2 \Delta}$$

の関係にあることを示した。ここで τ_s はシナプスの時定数、 Δ は相互相関をとる際のビン幅である。実際の結合推定には、一般化線形モデル (GLM) が広く用いられる [3]。ここでは、2 個のニューロン間の GLM [4] に基づき、数値的に生成されたスパイク列から結合推定を行って、先に導出した結果を確かめた。さらに、導入した Δn と、実験的に測定できる値である興奮性シナプス後電位 (EPSP) v [mV] との関係、確率微分方程式における初期通過時間の分布の解析により導いた。

最後に、これらの結果を確かめるため、モデルニューラルネットワークの大規模な数値シミュレーションを行なった。得られたスパイク列データから結合推定を行うことで、この研究により推定されたスパイク列の時間長さの下限を確かめた。ニューロンモデルには、Hodgkin-Huxley モデルを拡張したモデルが用いられた。これらは計算機上で並列計算された。

以上の結果を合わせることで、EPSP v [mV] をもつ結合を検出するために必要な、スパイク列の時間長さの下限を示した。これは結合推定を行う際にスパイク測定実験において必要な測定時間を与えている。

References

- [1] D. D. Bock *et al.*, Nature **471**, 177-182 (2011).
- [2] S. Fujisawa, A. Amarasingham, M. T. Harrison, G. Buzsáki, Nat. Neurosci. **11**(7), 823-833 (2008).
- [3] S. Shinomoto, Neural Networks **23**, 764-769 (2010).
- [4] R. Kobayashi, and K. Kitano, J. Comput. Neurosci. **35**(1), 109-124 (2013).

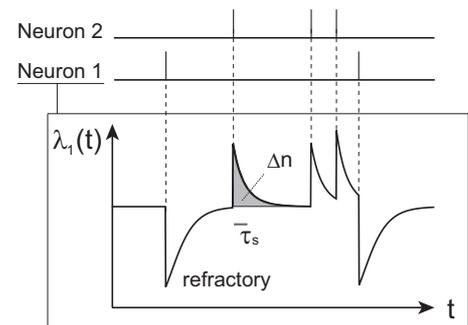


Fig. 1 The increase of the firing rate of neuron 1 after the spikes of neuron 2.

磁気トルク測定による FeSe の常磁性磁化率の磁気異方性

ナノ量子物性研究室 小林遼

Abstract We measure the magnetic torque of iron-based superconductor FeSe to detect the anisotropy of the magnetic susceptibilities between a and c axes. Change of the anisotropy of the magnetic susceptibilities was observed even well above the superconducting transition temperature, suggesting the presence of pre-formed pair in the BCS-BEC crossover regime.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

FeSe は、鉄系超伝導体の中で最も単純な結晶構造を持つ。この物質は 90K 程度で構造相転移を示し、その温度以下で軌道秩序の観測が報告されているが、他の鉄系超伝導体とは異なり極低温まで磁気秩序を示さないことが特徴的である。最近蒸気輸送法による FeSe の純良単結晶作成法が確立され、その特異な物性が徐々に明らかになりつつある[1]。FeSe はフェルミ面を形成するバンドが非常に浅い低キャリア系であることが報告されており、超伝導ギャップとフェルミエネルギーが同程度である BCS-BEC クロスオーバー領域に位置することが報告されている[2]。この領域では、クーパ対の大きさと平均電子間距離が等しくなり、これまでいかなる超伝導体においてもそのような状態は実現しておらず、その物理的性質に興味を持たれる。特にこの領域にある系では、 T_c よりも高温側で擬ギャップの存在や pre-formed pair を組むかどうか論争となっている。

本研究ではカンチレバー型磁気トルク計を用いて、pre-formed pair の形成に伴う電子系の異常の有無を調べるために、常磁性磁化率の面内一面直方向についての磁気異方性に関する精密測定を T_c 以上で行い、熱力学量の異常の観測を試みた。磁気トルクは

$$\tau = \frac{1}{2} \mu_0 H^2 (\chi_{cc} - \chi_{aa}) \sin 2\theta$$

のように磁化率の異方性と結びついている。ここで χ_{cc} , χ_{aa} はそれぞれ結晶軸の c , a 軸方向の磁化率、 θ は c - a 面内で磁場を回転させた時の c 軸と磁場方向の間の角度を表す。図 1 に 9K における FeSe の磁気トルクの θ 依存性を示す。また、この振幅から求めた磁化率の面内一面直異方性の温度依存性のグラフを図 2 に示す。常磁性物質では磁気異方性は温度依存性を示さないと考えられるが、今回磁気秩序を示さない FeSe において T_c 以上の温度領域から低温側に向かい磁気異方性の増大を観測した。

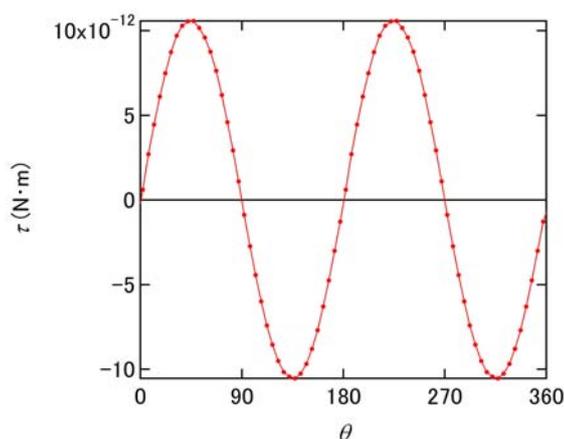


Fig. 1. Angle dependence of the magnetic torque of FeSe in a field of 2T.

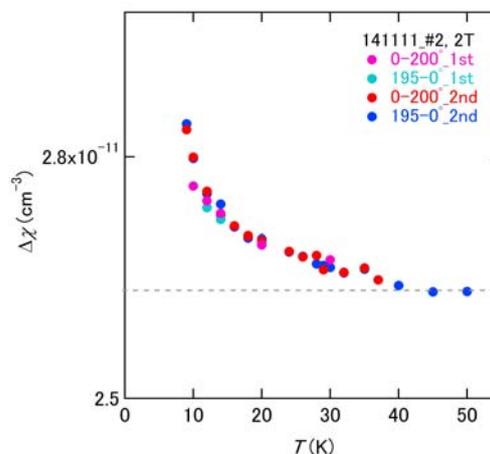


Fig. 2. Temperature dependence of the anisotropy of the magnetic susceptibilities between a and c axes.

References

- [1] A. E. Böhrner *et al.*, Phys. Rev. B **87**, 180505 (2013).
- [2] S. Kasahara *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **111**, 16309 (2014).

水酸基含有液晶 I-7 のフラストレート スメクチック C 相の発現要因

ソフトマター物理学研究室 佐藤隆人

Abstract I-7, a liquid crystal molecule, has three smectic C phases. SmC' is one of them who is novel frustrated-smectic phase and has in-plane modulation structure. We revealed that frustration is caused by difference of monomer and dimer length, and not caused by characteristics of Smectic C .

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

末端水酸基を持つ液晶分子 I-7 は、3つのスメクチック C 相 (SmC, SmC', SmC'') が発現する [1]。SmC はモノレイヤー構造を、SmC'' は水酸基の水素結合による二量体形成からバイレイヤー構造を形成する。SmC' はモノレイヤー構造とバイレイヤー構造の競合により、スメクチック層面内方向に変調構造が現れる特異なフラストレートスメクチック相 (Fr-Sm) である [2]。本研究ではこの Fr-Sm 相の起源を明らかにするため、「長さの違う分子の構成する単量体・二量体の存在比」および「SmC 相の構造」との関係性を研究した。

まず「長さの違う分子の構成する単量体・二量体の存在比」についてである。I-7 は温度に依存してモノレイヤー構造から Fr-SmC' を経てバイレイヤー構造に転移するが、I-7 の同属体で末端アルキル鎖の炭素数が 1 多い I-8 はモノレイヤー構造のみを、1 少ない I-6 はバイレイヤー構造のみを、温度に依存せず SmA, SmC いずれの相にお

いても発現する。本研究では、この I-6 と I-8 を混合すると Fr-SmC' 相が発現することを見出した (図 1)。そこで、赤外分光測定によって単量体・二量体の存在比を定量的に見積もることができる水素結合強度 (波数シフト) を比較した結果、I-6 と I-8 の混合系では、濃度に依存して単量体・二量

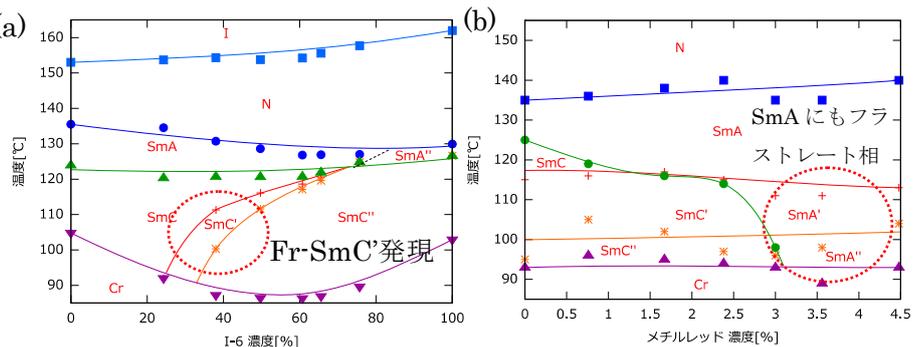


Fig.1 Binary phase diagram of (a) I-8 and I-6 (b) I-7 and methyl red

体の存在比が変化し、存在比が拮抗する濃度において Fr-SmC' が発現することが分かった。つまり長さの違う単量体・二量体の同時存在が、Fr-Sm 発現の重要な起源であることを示唆している。

次に「SmC 相の構造」と Fr-Sm の起源の関係を明らかにするため、I-7 とメチルレッド (MR) の混合系を研究した。I-7 は SmC 領域にのみ Fr-Sm が現れる。I-6 を I-7 に混合し同温度での二量体の割合を増やすことにより、高温側の SmA 領域での Fr-Sm の発現が試みられた [2] が、Fr-Sm は SmC 領域のみにとどまったことから、SmC 相の構造が起源にかかわるのではないかと思われた。しかし本研究の MR 混合系では、MR の濃度上昇とともに SmA-SmC 相転移温度が急激に低下することがわかった (図 2)。特に X 線回折測定から、SmC 相が消失する MR3%以上の濃度では、SmA 相でも Fr-Sm が存在することを見出した。つまり MR 分子混合は、SmA-SmC 相転移温度にのみ強く作用し、Fr-Sm 相の成因に直接的には関与していないと理解できる。これらのことから Fr-Sm の発現には、SmC の構造、すなわち層に対する分子の傾き (チルト) がある、層周期が温度に依存して大きく変化する、といった性質は重要ではないと結論できる。

References

- [1] A. Yoshizawa et al., *J. Phys. Chem. B* **114**, 13304-13311 (2010)
- [2] Y. Kimoto, A. Nishizawa, Y. Takanishi, A. Yoshizawa, and J. Yamamoto, *Phys. Rev. E* **89**, 042503 (2014)

各点磁場中冷却過程による Sr₂RuO₄ の交流磁化率と渦糸状態

固体量子物性研究室 柴田大輔

Abstract To investigate vortex-matter phases in the spin-triplet superconductor candidate Sr₂RuO₄, we studied the ac-susceptibility by adapting two different thermal processes. We find that the ac-susceptibility signal substantially changes with the “each-point field cooling” process. This result indicates that we succeed in inducing new metastable vortex states and revealing a new vortex phase at low fields. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

層状ルテニウム酸化物超伝導体 Sr₂RuO₄ はカイラル p 波スピン三重項超伝導体の有力な候補物質である [1]。スピン三重項超伝導体では、そのクーパ対の状態ベクトルがスピンと軌道の自由度を持つため、異なる秩序変数で特徴付けられる複数の超伝導状態が磁場下で発現する可能性が指摘されている [2]。一方、秩序変数の変化による相とは別に、通常の第2種超伝導体であっても転移温度に近づくにつれ渦糸間の相互作用に起因した多彩な渦糸状態が生じる。こうした vortex-matter の振る舞いは銅酸化物高温超伝導体で特に有名だが、低めの転移温度を持つ超伝導体でも重要である [3]。よってスピン三重項性に起因した超伝導相の変化と vortex-matter に起因した超伝導相の変化を区別できるように、Sr₂RuO₄ の渦糸状態の詳細な研究が必要とされている。また、面内方向に磁場をかけたとき Sr₂RuO₄ の超伝導転移は 0.8 K 以下では一次転移であることが報告されている [4]。この転移の直下でどのような渦糸状態をとるのかもスピン三重項超伝導体の一次転移の起源を探る上で重要である。

我々は Sr₂RuO₄ の渦糸状態を調べるために、精密に方向を制御した磁場下で交流磁化率 χ の測定を2つの熱過程で行った [5]。すなわち通常の field sweep (FS) だけでなく、磁場をかけた各点において超伝導転移温度以上まで温度を上げて超伝導を一旦壊してから超伝導転移温度 $T_c(H)$ 以下に急冷し、データを取るという “each-point field cooling (EPFC)” を導入した。その結果、通常の超伝導体の磁化率曲線と同様の FS の磁化率曲線と、FS とは顕著に異なる EPFC の磁化率曲線を得た (Fig.1)。この結果は FS と EPFC では得られる渦糸状態が異なることを意味している。またある磁場 H^* 以下では FS と EPFC の磁化率に差が生じないことから、別の相になることが推測される。さらに、直流磁場をわずかに変化させることで磁化率曲線の安定性を調べたところ、EPFC の渦糸状態はわずか 10^{-3} T の磁場サイクルでも壊れて FS の渦糸状態に近づいていく、準安定な状態であることがわかった。

本研究で見出した低磁場相での渦糸状態や高磁場での一次転移との関係など、これらの結果は、渦糸状態の寄与は、Sr₂RuO₄ の超伝導状態相図の研究を行うにあたり渦糸状態の寄与も決して無視できるものではないことを示している。また、本研究で導入した EPFC は渦糸状態を調べるのに比較的容易な方法として、他の超伝導体の研究にも有効に利用できるだろう

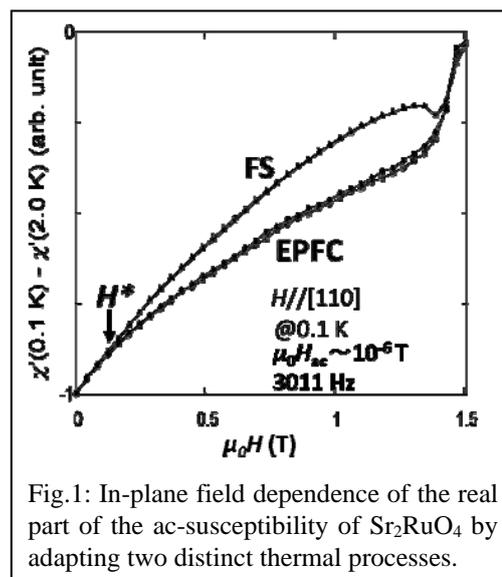


Fig.1: In-plane field dependence of the real part of the ac-susceptibility of Sr₂RuO₄ by adapting two distinct thermal processes.

References

- [1] Y. Maeno *et al.*, J Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 011009.
- [2] Y. Yanase *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 044711.
- [3] S. Banerjee *et al.*, Physica C **355** (2001) 39.
- [4] S. Yonezawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 077003.
- [5] D. Shibata *et al.*, submitted to Phys. Rev. B; arXiv:1411.6112.

圧力下における強磁性超伝導体 UCoGe の ^{59}Co 核四重極共鳴(NQR)

固体量子物性研究室 杉本大輔

Abstract We performed ^{59}Co -NQR measurement on single-crystal UCoGe under hydrostatic pressure. With increasing pressure, Curie temperature is suppressed and we found that nuclear spin-lattice relaxation rate $1/T_1$ shows a $T^{-1/3}$ dependence down to 0.15 K at $P = 1.33$ GPa. This is the temperature dependence theoretically suggested at a ferromagnetic quantum critical point.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

2000年に強磁性体 UGe_2 [1] が超伝導を示すことが報告されて以来、いくつかの強磁性ウラン化合物で超伝導が発見された。本来競合するはずの強磁性と超伝導がどのように共存するのかや、超伝導の発現機構を解明するべく、世界的に研究が行われている。その中の一つである UCoGe[2]は $T_{\text{Curie}} \sim 3$ K で強磁性転じたあと、常圧で超伝導 ($T_{\text{sc}} \sim 0.6$ K) を示し、 T_{sc} が最も高いことから実験が比較的容易な物質である。また、コバルト原子核は核磁気共鳴 (NMR) ・核四重極共鳴 (NQR) 可能な原子核であるため、超伝導の仕組みを NMR/NQR 実験を用いてミクロな観点から明らかにするうえで UCoGe は格好の物質である。我々のグループは、これまでに NMR 実験で c 軸に平行な磁場によって強磁性ゆらぎを制御し、強磁性ゆらぎと超伝導に正の相間があることを明らかにした[3]。

強磁性と超伝導の関係をさらに調べる上で、これらの圧力依存性を調べることは有効である。なぜなら、UCoGe の温度-圧力相図[4]において、静水圧により強磁性は単調に抑制されるが、強磁性相境界と超伝導相境界の交わる圧力 (~ 1.2 GPa) で超伝導転移温度 T_{sc} は最大値をとり、さらに圧力を大きくするとウラン化合物強磁性超伝導体の中でも UCoGe 特有の常磁性超伝導相が現れるためである。しかし、常磁性状態での超伝導の性質はよく調べられていない。

今回、我々は単結晶 UCoGe 試料 (名大 佐藤教授のグループより提供) を用いて静水圧力下における ^{59}Co 核四重極共鳴 (^{59}Co -NQR) 実験を行い、強磁性ゆらぎが圧力によってどのように変化するかを系統的に調べた。NQR は縮退している核スピンのエネルギー準位が周囲の電荷の作る電場勾配によって解けることを利用するため、外部磁場を必要とせず、原子核位置における内部磁場や磁気ゆらぎ、超伝導の情報を得るのに有効である。

測定した核スピン-格子緩和率 $1/T_1 T$ を図に示す。 $P \leq 0.74$ GPa の広い温度領域で遍歴強磁性体に見られるキュリー・ワイス的な温度依存性 ($\propto (T - T_{\text{Curie}})^{-1}$) を示すことが確認できた。一方、 $P = 1.33$ GPa においては、0.15 K まで $1/T_1 \propto T^{-1/3}$ ($1/T_1 T \propto T^{-4/3}$) の振舞いがみられた。これは理論的に強磁性量子臨界点近傍で予測される温度依存性であり、この実験結果は強磁性量子臨界ゆらぎを観測した数少ない例であると考えられる。

References

- [1] S. S. Saxena *et al.*, Nature **406**, 587-592 (2000).
- [2] N. T. Huy *et al.*, Phys. Rev. Lett. **99**, 067006 (2007).
- [3] T. Hattori *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 066403 (2012).
- [4] E. Slooten *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 097003 (2009).

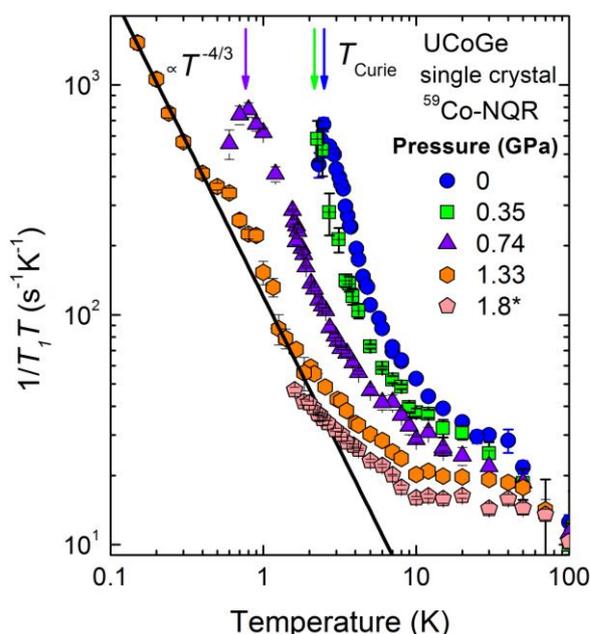


Fig. 1. ^{59}Co nuclear spin-lattice relaxation rate at various pressure.

疑似表面プラズモンをもちいた 光の軌道角運動量に関する光学遷移選択則の研究

光物性研究室 平岡友基

Abstract: To clarify the optical transition selection rule for the orbital angular momentum of light, we fabricated micrometer-sized metallic disks with corrugated circumferences. We measured its near-field electric field distribution under excitation by an optical vortex. A dipole mode which seems to be spoof localized surface plasmons was observed.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

光渦はらせん状の波面を持つ光の固有モードであり、軌道角運動量を有することが知られている[1]。これまでに光の軌道角運動量を用いた物質の操作に関する研究が行われ、マクロな大きさの粒子の回転、ボーズ凝縮した原子系やポラリトン凝縮系での渦糸の生成等、様々な系において物質に軌道角運動量を転写できることが分かってきた。最近、光渦を用いることで平面波励起では不可能な高次の局在表面プラズモンの励起が可能という計算結果が報告された[2]。これは物質系に古典的な運動を誘起するのではなく、光の軌道角運動量自由度を使った新しい光学遷移の選択則の可能性を示唆する点で重要である。

光の軌道角運動量による高次モード励起の観測を目指し、プラズモンの近接場電場の時間・空間分解測定が可能でテラヘルツ (THz) 周波数帯で実験を行った。サンプルとして、疑似局在表面プラズモンモード[3]を持つマイクロメートルサイズの金属構造体を、フォトリソグラフィと真空蒸着により作製した。ガウスビームから軌道角運動量を有する光渦を生成するために、2 THz の周波数に対するらせん位相板を設計し、テラヘルツ帯で吸収の低い樹脂の Zeonex 材料を機械で切削して作製した。図 2 の位相の空間分布からわかるように、シングルサイクルの THz 光にらせん位相板を挿入することによって、光渦の生成に成功した。この光渦と通常のガウスビームをもちいて金属構造体を光励起し、実時間テラヘルツ近接場顕微鏡[4]を用いてその近接場電場を時間・空間分解で測定した。

ガウスビーム励起時の金属構造周辺の電場の 300 GHz 成分をリファレンス電場の 300 GHz 成分で割った、電場増強度の分布を図 3 に示す。300 GHz において構造の外周に局在した電場を伴う電気双極子が励起されている。大きさの異なる構造での実験結果では構造が大きいほど双極子モードは低周波側に現れており、これは疑似局在表面プラズモンの理論と合っている。しかし今回用いた位相板で作る光渦では 300 GHz 成分の軌道角運動量はほぼ 0 であるため、光渦励起による差はみられなかった。双極子モードの周波数から、疑似局在表面プラズモンの四重極モードは 500 GHz 付近にあると予想しており、500 GHz で軌道角運動量 1 の光渦を用いた実験で疑似局在表面プラズモンの高次モードが励起可能と考えている。

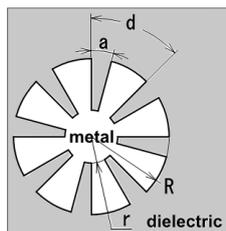


Fig. 1. Metal structure with spoof localized surface plasmon resonance. The design of fabricated samples is $r/R = 0.33$, $a/d = 0.44$, $d/2\pi R = 30$ and $R = 50 \sim 150 \mu\text{m}$.

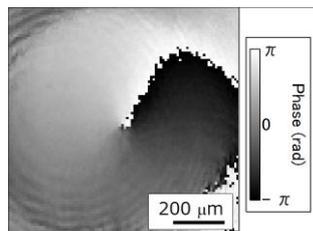


Fig. 2. Phase distribution of 2 THz Fourier component of terahertz optical vortex at the focal plane, measured by the terahertz microscope.

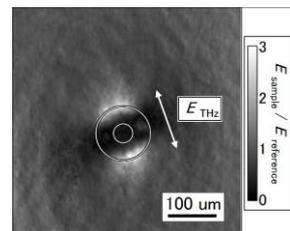


Fig. 3. Field enhancement factor distribution of 0.3 THz component, around a metal structure excited by Gauss mode THz wave. The Arrow shows the polarization of THz wave.

References

- [1] L. Allen et al., Phys. Rev. A **45**, 8185 (1992)
- [2] K. Sakai et al., PIERS 2013, Stockholm, Aug. 2013
- [3] A. Pors et al., Phys. Rev. Lett. **108**, 223905 (2012)
- [4] F. Blanchard et al., Opt. Express **19** (9), 8277 (2011)

平行平板中の超流動³Heのテクスチャ

低温物理学研究室 本田弦

Abstract We have studied inhomogeneous textures of superfluid ³He in a very thin parallel plate container. We performed numerical calculation to obtain the shape of metastable textures.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

³Heは常圧において絶対零度まで冷却しても固化することなく、液体の状態を維持する。液体³Heは極低温に冷却すると、約1 mKで超流動転移する。超流動状態では、転移温度における比熱の不連続な変化や、粘性の消滅などといった特異な性質を示す。超流動転移すると、A相やB相といった対称性の異なる状態が現れる。A相ではその異方性からいくつかの物理量も異方的な挙動を示す。超流動³HeのA相に対応するABM状態における空間の秩序状態を決定するオーダー・パラメータは

$$A_{\mu j} = \Delta \hat{d}_{\mu} (\hat{m}_j + i \hat{n}_j) \quad (1)$$

と表される。(1)を構成する単位ベクトル \hat{d} 、 \hat{m} 、 \hat{n} 、さらに $\hat{l} = \hat{m} \times \hat{n}$ の空間的な構造をテクスチャと呼ぶ。また(1)から、超流動状態の³Heを構成するCooper対が破壊されて常流動状態となってしまう最低のエネルギーであるエネルギー・ギャップが異方的な構造をとることが導かれる。このギャップ構造の異方性に由来して、³Heを入れている容器の壁の近傍において \hat{l} ベクトルが壁に対して垂直に配向するという境界条件が存在する。これらに加えて、エネルギー・ギャップの大きさよりもはるかに微小な自由エネルギーによってテクスチャの形が決定される。その自由エネルギーには双極子相互作用 f_{dip} 、 \hat{d} ベクトルの磁場との相互作用 f_{mag} 、勾配エネルギー f_{grad} など複数の寄与がある。テクスチャはこれらの競合するエネルギーを系全体で最適化するように配向する。すなわちこれらの和 f_{tot} を最小化することによりテクスチャの構造が予測できる。テクスチャがどのような形をとっているかを実験で直接測定することは現状では困難なので、数値計算を用いたシミュレーションによりその形を推測することは、様々な条件下でのテクスチャの研究にとって有効な手段である。

先行研究において、間隔100 μm の平行平板壁の容器に³Heを閉じ込めたものを急激に冷却させて、常流動状態から超流動のA相へ転移させてNMRやMRSIを用いて測定された。MRSIとはMRIを発展させたもので、共鳴周波数の空間分布を測定する技術である。A相転移すると、NMRの共鳴周波数が常流動状態のものから均一にシフトするが、その実験では局所的に周波数シフトが異なる部分が存在することが観測された。しかしながらその正体については現在のところ解明されていない。これに対する予想としては、急速に冷却した際に全体としてはテクスチャは同じ方向を向いており均一となっているが、特異点的にテクスチャが不均一になっている欠陥が生成されていることなどが予測される。そのような場所では、競合する各エネルギーを最適化するために、ベクトルが徐々に曲げられて周りとの整合を取るように配列して準安定な状態を作っていると考えられる。そこで本研究ではそうしたテクスチャの構造を数値計算によるシミュレーションを参考にして解明することを考えた。

シミュレーションの手法としては、容器を空間で分割してサイトごとに f_{tot} を計算して、これを極小化する計算を行う。この際、各ベクトル \hat{d} 、 \hat{l} 、 \hat{m} 、 \hat{n} 、を微小角だけ回転させてみて、局所的なエネルギーが低くなった方向に回転させる。これをすべてのサイトについて順に計算し、ベクトルをより安定な方向に配向させる。この手法では局所的なエネルギーの大小によって方向を定めているが、一連の計算を何度も繰り返し行うことにより容器全体の自由エネルギーが最小化されることが期待される。こうした手法を用いて、テクスチャが均一とならない境界条件を課すことで、平行平板中に生成する準安定なテクスチャを得ることができる。

X線コンプトン散乱測定による 低密度液体ナトリウムの電子運動量密度

不規則系物理学研究室 宮武至

Abstract We have studied the valence-electron momentum density in molten sodium using X-ray Compton scattering. Compton profiles of sodium deviate from those of the free electron gas (FEG) model as the density decreased. We discuss the density dependence of the electron-electron interaction in molten sodium.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

液体状態の金属は気液臨界点に沿って密度を連続的に低下させていくと、臨界密度近傍で絶縁体へと転移する。非金属化に至るまでの低密度化した液体金属中の価電子は構成粒子間の相互作用の影響を強く受けることが、これまでの電気伝導や帯磁率測定により明らかにされている[1]。

我々はこれまで金属元素の中でも価電子が自由電子ガスモデルでよく記述されるアルカリ金属を対象とし、特に Rb や Cs の低密度化流体状態における電子状態を明らかにするため、放射光コンプトン散乱測定を実施してきた。この測定では電子の運動量密度分布を散乱ベクトルに射影した分布、コンプトンプロファイル (CP) を直接測定することができる。測定の結果、低密度化に伴って粒子間相互作用の増大により自由電子ガス (FEG) モデルの予測から逸脱する挙動が観測されている。本研究では、アルカリ金属の中でも、Rb や Cs に比べフェルミ面がより球形に近く FEG 的である Na を実験対象とした。Na の固体状態の CP は過去に測定されているが[2]、液体状態では高温液体 Na を保持できる容器の開発により本研究で初めて測定された。低密度化に伴う Na 価電子状態の変化を電子運動量密度分布の形状やフェルミ運動量等を通じて調べ、伝導電子間の相互作用に関する知見を得ることを試みた。

実験は SPring-8 の BL08W において実施した。入射 X 線のエネルギーは 115.6 keV で、70keV から 90keV の散乱 X 線 (散乱角 165°) を検出し、融点付近から 1000°C までの液体 Na の CP を測定した。200°C と 1000°C の CP 及び Hartree Fock 計算[3]による内殻電子の CP を図に示す (Fig. 1)。価電子部分のプロファイルの明瞭な立ち上がりから Na が FEG 的であることが分かる。また低密度化に伴いプロファイルの幅が狭くなるってることが分かる。この分布を FEG と比較することでそのずれが低密度化に伴い増大することが実験的に明らかになった (Fig. 2)。これは FEG では考慮されていない電子間相互作用の影響によるものである。更に本研究では電子間相互作用を含むいくつかの理論との比較から、液体 Na 価電子の相互作用についてその密度依存性を詳細に議論する。

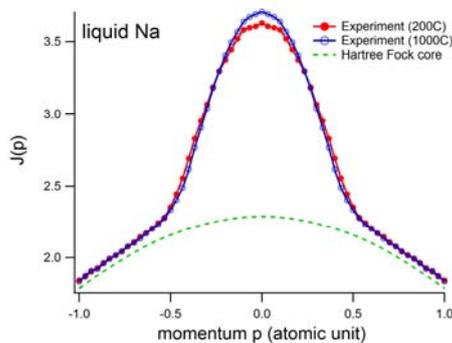


Fig1. Experimental CPs for liquid Na. Also shown is the core CP calculated with Hartree Fock method [3].

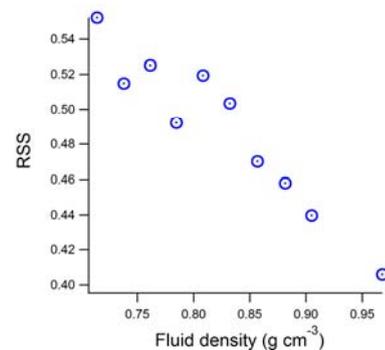


Fig2. Residual sum of squares (RSS) for the experimental CPs and those calculated with the FEG model.

References

- [1] F. Hensel and William W. Warren, Jr., Fluid Metals: The Liquid-Vapor Transition of Metals (Princeton 1999).
- [2] S. Huotari et al., PRL **105**, 086403 (2010)
- [3] F. Biggs et al, Atom Data Nucl. Data Tables **16**, 201 (1975)

ネマチック液晶の配向秩序度変化による 金ナノ粒子のマニピュレーション

ソフトマター物理学研究室 森田智之

Abstract We have increased the molecules transportable by the molecule manipulator which driven by spatial variation of scalar order parameter of nematic liquid crystal in order to make high spatial variation of refractive index. We transported gold nanoparticles by manipulator and measured spatial variation of their density by their fluorescence excited by green light.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

液晶中に混合された不純物間には、その半径が $1\mu\text{m}$ より大きい場合、液晶の配向場と結合して不純物間に長距離の相互作用が作用する。しかし半径が $1\mu\text{m}$ より小さい場合は、配向場の弾性エネルギーが表面のアンカリングエネルギーを凌駕するため、配向場との結合が消失し、秩序変数との直接的な結合が支配的となる。佐光らはこの結合を利用し、ネマチック液晶の秩序変数の空間変化を人為的に作り出し、不純物濃度場を操作する、分子マニピュレーターの原理の発明と試作を行った[1]。ネマチック液晶に混合したアゾベンゼン分子の Trans-Cis 異性化を紫外線で励起することで、秩序変数の空間変化を等温条件下で実現する。また、アゼベンゼン分子の並進拡散を、アゾベンゼン分子を高分子化させることで抑え、高解像度の濃度変化を得ることができる[2]。最終的には、分子マニピュレーターによる人工的なフォトニック構造の自在な設計と作成を目指している。本論文では、不純物の濃度変化によって、より高い屈折率変化を実現するために、金ナノ粒子をマニピュレーションすることを目的とした。

金ナノ粒子は、直径 5nm の金ナノコロイドにデカンチオールを修飾し液晶に溶けるようにした。金ナノ粒子の空間濃度分布を観測するために、緑色光(波長 $530\text{--}550\text{nm}$)を落射励起光として照射し、金ナノ粒子が発光する蛍光の空間強度分布を計測する。液晶の配向秩序度を低下させるために試料の一部に UV 光(波長 $330\text{--}385\text{nm}$)を照射し、高分子アゾベンゼンを Cis 体に異性化させる。図 1 は照射した UV 光のプロファイル、図 2 は UV 光照射後の試料の蛍光を UV 光照射前の値で割ったものである。UV 光照射領域の蛍光強度が上昇することから、金ナノ粒子の濃度が増加していることがわかる。このように分子マニピュレーターの原理を用いて、金ナノ粒子の濃度を局所的に濃縮することに成功した。またマニピュレーターの解像度は、照射 UV プロファイルの半値幅 $17.8\mu\text{m}$ に対して、マニピュレーション後の蛍光強度比の半値幅 $18.0\mu\text{m}$ であった。一方、金ナノ粒子を局所的に濃縮したのち励起光を遮断すると、金ナノ粒子の拡散により蛍光強度分布が減衰する(図 3)。

この減衰の過程を観測することで、金ナノ粒子の拡散定数が測定できる。測定された拡散係数はダイレクターの垂直方向が $1.03 \times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ 、平行方向が $1.45 \times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ であった。ブラウン運動におけるアインシュタイン-ストークスの関係式を用いて見積もられる金ナノ粒子の直径は $12.2\text{nm}\text{--}17.2\text{nm}$ であり、デカンチオールによって修飾された金ナノ粒子の直径 8nm の $1.5\text{--}2$ 倍ほどであるので、妥当な値であるといえる。

References

- [1] S.Samitsu, et al., Nature Materials, 9, 816 (2010)
- [2] 瀧口 達矢, 修士論文, 京都大学, 2011

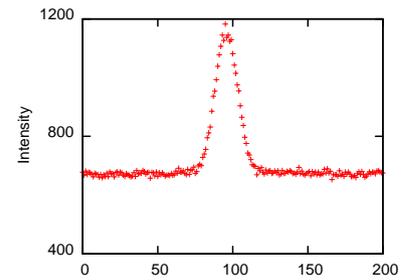


Fig.1. Profile of UV irradiation

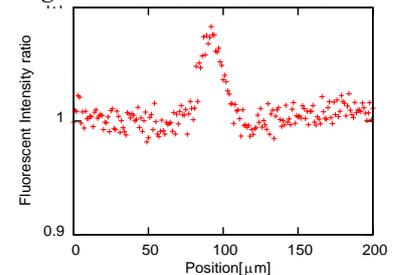


Fig.2. Fluorescent Intensity change after a manipulation

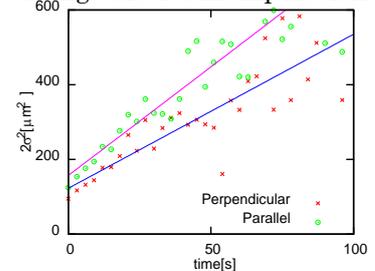


Fig.3. Diffusion of gold nanoparticles in the direction perpendicular and parallel to the director

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.

© 2015 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).