令和2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

2021年2月1日(月)、2月2日(火)

物理学第一分野

物理学第一分野修士論文発表会

場所:オンライン 発表:15分(別に質問時間5分程度)

2021年2月1日(月)9:00~17:50												
目 次												
1. ゲルネットワークとネマチック配向秩序の動的結合と動	的不均 [。] 大岡	一性 明徳	(9	: () ())•	•	•	•	•	1
2.鉄系超伝導体 FeSe の高磁場超伝導相	鈴木	裕貴	(9	: 2	2 0)•		•	•	•	2
3. 分子モーター模型における運動論的非対称性と様々な効果	率 田口	貴哉	(9	: 4	10)•	•	•	•	•	3
4.近藤絶縁体 YbIr3Si7 における磁性と中性フェルミオン励	〕起 冨永	貴弘	(1	0	: () ())•	•	•	•	•	4
5. 空間反転対称性が破れた強相関電子系における新奇超伝言	導相に 野垣	関する 康介	理詣 (1	줶 0	究 : 2	20)•	•	•	•	•	5
$1 0 : 4 0 \sim 1 0 : 5 0$	休憩											
6. 強い異方性を持つエアロジェル中における超流動 3He	久光	倫央	(1	0	: 5	50)•	•	•	•	•	6
7. 2次非線形光学過程を用いた赤外量子もつれ光子対発生	と検出 北條	真之	(1	1	: 1	0)•	•	•	•		7
8. コロイド粒子とラメラ相との動的結合	吉岡	真吾	(1	1	: :	30)•		•	•	•	8
9. 密度行列くりこみ群によるスピン1近藤ハイゼンベルク	鎖の解 増井	析 陸	(1	1	: 5	50)•	•	•	•	•	9
10.Kitaev 磁性体 α -RuCl ₃ の薄膜作製	井伊	崇仁	(1	2	: 1	0)•	•	•	•	• 1	0
$1\ 2\ :\ 3\ 0\sim 1\ 3\ :\ 3\ 0$	昼休み	*	-									
11. 球面の表面張力における曲率依存性と有限サイズ効果	池田	圭吾	(1	3		30)•	•	•	•	• 1	1
12. グラフェンにおけるテラヘルツ磁気分光	江口	航平	(1	3	: 5	50)•	•	•	•	• 1	2

1 3. Estimating a self-excitation kernel from a series of even HERNANDEZ RUIZ,	nts LUIS	IVAN	(1	4	:	1	0)	•	•	•	•	•	13
14.2次元2成分量子乱流減衰過程における渦クラスタ構造	大西	祐介	(1	4	:	3	0)	•	•	•	•	•	14
$14:50 \sim 15:00$	休憩												
15. 相互作用のある対称性保護トポロジカル相の 非自明相における一般化された Thouless ポンプについ	いて 大山	修平	(1	5	:	0	0)		•	•	•	• 1	15
16.制限ボルツマンマシンと1次元量子相転移の研究	尾田	直人	(1	5	:	2	0)	•	•	•	•	•	16
17. Cu ₂ O における励起子の和周波分光	片桐	佳来	(1	5	:	4	0)	•	•	•	•	•	17
18.線ノード金属 CaSb2の超伝導発見	川口	真世	(1	6	:	0	0)	•	•	•	•	•	18
$1 6 : 2 0 \sim 1 6 : 3 0$	休憩												
19.核磁気共鳴/核四重極共鳴測定を用いた CeRh ₂ As ₂ の超伝言	導と磁 木舩	性の研 茉悠	F究 (1	6	:	3	0)	•	•	•	•	•	19
20. ハロゲン化鉛ペロブスカイトナノ粒子におけるホットエ	キシト 媚山	ンダイ 悦企	ナミ (1	ミク 6	マス :	; 5	0)	•	•	•	•	•	20
21. ワイル近藤半金属における非線形応答に対する強相関効	果につ 児藤	いての 鑑	研9 (1	ቺ 7	:	1	0)	•	•	•	•	•	21
22.2次 NI 相転移点近傍の流動場効果と臨界現象	高橋	希	(1	7	:	3	0)	•	•	•	•	•	22
2021年2月2日(火)9:00~16:00													
23. ネマティック超伝導の観測に向けた fiber Bragg grating	による 谷口	多軸(諒	トず。 (みì 9	則)) :	定 0	0)	•	•	•	•	•	23
24. 単一ペロブスカイトナノ粒子の低温発光スペクトルの研究	究 張	健一	(9	:	2	0)	•	•	•	•	•	24
25.磁気共鳴による液体 ³ He の流れ場検出法の開発	長岡	知己	(9	:	4	0)	•	•	•	•	•	25
26. 半導体ナノ粒子からの高次高調波発生の研究	中川耒	井太郎	(1	0	:	0	0)	•	•	•	•	•	26

27. 自己推進する物体間に働く流体相互作用:埋め込み境界	法を用 中田	いた数 拓海	:値角 (1	军析 0	ř : 2	20)•	•	•	•	• 2	27
$1 0 : 4 0 \sim 1 0 : 5 0$	休憩											
28. 非エルミートワイル半金属におけるカイラル磁気表皮効	」果 中村	大地	(1	0	: {	50)•	•	•	•	• 2	28
29. 強誘電ネマチック相を示す棒状液晶分子モデルの分子動	」力学シ 服部	ミュレ 爽音	~ シ (1	⁄э 1	ン : 1	10)•	•	•	•	• 2	29
30.精微な計算量理論に基づく量子超越性	早川	龍	(1	1	• •	30)•	•	•	•	• (3 C
31.2軌道光格子中の超低温原子:量子スピン輸送の観測と	超精密[肥後2	司位体 本隼也	シフ (1	、ト 1	の】 : {	則定 5 0)•	•	•	•	• 3	31
32. 視野角制限 Vicsek モデルの構造形成	平野	稜	(1	2	:]	10)•	•	•	•	• {	32
$1\ 2\ :\ 3\ 0\sim 1\ 3\ :\ 3\ 0$	昼休み	ب										
33.液晶系の相分離における配向と欠陥の操作	増田	聖弘	(1	3		3 0)•	•	•	•	•	3 3
34. 強磁性超伝導体 UCoGe における特異な磁気転移及び b 軸磁場によって増強される強磁性ゆらぎと超伝導の	研究 松崎	聡	(1	3	: {	50)•	•	•	•	• (34
3 5. Creation of large mass imbalanced ultracold atomic m alkali and rare-earth metals with tunable interaction	iixtures ons 水上	of 尚人	(1	4	: -	10)•	•	•	•	• (35
36.小角散乱と超遠心分析の統合解析法の確立とタンパク質	複合体 宮本	の構造 洋佑	解明 (1	月へ 4	、のう ::	適月 3 0])•	•	•	•	• :	36
$14:50 \sim 15:00$	休憩											
37. FeSe における超流動密度に対する量子幾何補正	山下	達也	(1	5	: (0 0)•	•	•	•	• (37
38. 高分解能 X 線散乱測定によるナトリウムの運動量分布	山本	明史	(1	5	· 2	20)•	•	•	•	• ;	38
39. 光制御 Slippery 界面と表面ダイレクタの外場応答	吉中	智弘	(1	5	: 4	40)•	•	•	•	• (39

ゲルネットワークとネマチック配向秩序の 動的結合と動的不均一性

ソフトマター物理学研究室 大岡明徳

Abstract It was found that the relaxation time of the orientation fluctuation of the nematic director changes depending on the distribution of the polymer chains in the nematic gel due to the dynamic coupling of the motion of polymer chains and the orientation of nematic liquid crystals. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

液晶分子にアクリレート基を付与したモノマーを重合することで得られる高分子液晶は、光学的異方 性を持つ配向フィルムや、異方性により材料の力学的性質の改良などを目指して開発されている。さら に、ジアクリレートなど架橋剤により架橋した場合は、高分子液晶ゴムや、モノマーの溶媒で膨潤され た液晶ゲルとなり、光学的性質、力学的性質、さらには温度依存性などに特徴が現れる [1]。特に架橋 剤密度が低く弾性的にソフトな場合、力学的な性質と光学的な性質が結合して興味深い現象が現れる[2]。

本研究では液晶分子の Heptyl-cyanobiphenyl (7CB)を主成分とし、液晶にアクリレートのついた Hexyl-cyanobiphenyl acrylate (LC-A)を8%、架橋剤としてRM257を0.6と0.8%混ぜ、重合開始剤である DMPAPを少量加えたものを用いた。これにUV(365 nm、880 µW/cd)を30分当てて重合した。架橋剤濃 度が1%前後の時、ネマティック相の配向秩序の揺らぎは、高分子網膜の弾性に完全に抑制されずに、 両者は動的に結合していると考えられる[2]。本研究では、架橋剤の濃度を変えながら、両者の動的な結 合を研究した。まず、偏光顕微鏡により、相転移温度や相転移のモルフォロジーを確認した。一方、動 的光散乱法を用いて、ネマティック相における配向揺らぎの緩和時間とその分散関係の測定を行った。

Fig.1 は架橋剤が 0.6%の重合後のネマティック相の配向揺らぎの自己相関関数(Fig.1(a))と、0.8%のそれ(Fig.1(b))である。0.6%では関数形が指数関数であるのに対し、0.8%では伸長している。ここから緩和時間がブロードに広がっていると分かる。Fig.2 は 0.6%の重合前後の分散関係(Fig.2(a))と、0.8%のそれ

(Fig.2(b))である。1) 重合前は 0.6%,0.8%とも速 度、波数依存性とも類似の分散関係を示すが、 重合後は、架橋剤の濃度が低い 0.6%では約5倍、 0.8%では約10倍遅くなっている。2)架橋剤濃度 の高い 0.8%では、低波数領域で緩和時間が一定 になっており、いわゆる「揺らぎの閉じ込め効 果」が観測されている。架橋剤濃度が低い 0.6% で閉じ込め効果がないのは、架橋点密度が不十 分で、有効な網目構造がないと推測される。

このため、RM257を0.6%の重合後の試料は高 温にすることで、高分子自体の相分離が起こり (Fig.3)、高分子鎖の濃度が場所により異なる。 この結果、ネマティックの配向緩和時間にも有 限の差が現れる。ここで試しに、動的不均一性を 可視化できる揺らぎ顕微鏡[3]で観測すると、緩和 時間の空間分布が得られることも分かった(Fig.4)。

References

[1] R. A. M. Hikmet, "Anisotropic gels and plasticized networks formed by liquid crystal molecules," Liquid Crystals, 9:3, 405-416 (1991)

[2] C.C. Chang, et al. "Electro-optical study of nematic elastomer gels," Phys. Rev. E 56, 595 (1997)
[3] 鵜飼祐生,"揺らぎ顕微鏡の作製," (2018)



separation(After polymerization, RM257:0.6%、42°C) Fig.4 Fluctuation microscope image(After polymerization, RM257:0.6%、40°C)

鉄系超伝導体 FeSe の高磁場超伝導相

量子凝縮物性研究室 鈴木裕貴

Abstract We investigated the high-field superconducting phase of FeSe, which is located in the BCS-BEC crossover regime. Specific heat exhibits a distinct kink anomaly below H_{c2} parallel to *c*-axis, providing a thermodynamic evidence for a phase transition inside the superconducting phase. This high-field phase is discussed in terms of FFLO state. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

鉄系超伝導体 FeSe は、様々な実験から極めて小さいフェルミ面をもつことが明らかになっており、 フェルミエネルギーと超伝導ギャップが同程度のエネルギースケールを持つ BCS-BEC クロスオーバー 領域に位置する超伝導体であると考えられている[1,2]。このような物質に強磁場を印加すると、ゼーマ ンエネルギーと超伝導ギャップ、フェルミエネルギーの3つのエネルギーが拮抗し、非自明な超伝導状 態の実現が期待される。FeSe では c 軸磁場下における熱輸送測定により、極低温高磁場において新奇超 伝導相の存在が示唆されているが、その詳細については明らかにはなっていない[1,2,3]。

このようななか、最近、極低温高磁場下での走査トンネル顕微鏡/分光(STM/STS)測定による準粒子

干渉(QPI)実験から、熱輸送測定で報告された高磁場相への相境 界 H*近傍で超伝導シグナルが消失していることが観測された [4]。STM/STS 測定は表面敏感な測定であることから、この結果 は少なくとも表面で超伝導オーダーパラメータが H*近傍でゼ ロになっていることを示している。一方、H*以上でバルクの超 伝導が消失しているか否かはわかっておらず、高磁場超伝導相 が真に存在するのかを明らかにするには、同一試料を用いたバ ルク測定より、超伝導状態を検証する必要がある。

そこで我々は STM/STS 測定で用いた同一試料を用いて、c 軸 磁場下における電気抵抗ρ、磁気トルクτ、比熱 C の詳細な磁場 依存性を調べた。電気抵抗と磁気トルクの測定の結果、STM/STS 測定で求めた磁場 H*opt よりも高磁場領域において不可逆磁場 H^{irr}_{ρ} 、 H^{irr}_{τ} が観測された。このことは、 $H > H^*$ においてもバルク の超伝導が実現していることを示している。比熱測定からは、 図 1 のように H_{c2}以上において比熱の磁場依存性がなくなる振 る舞いがみられ、H_{c2}以下の磁場 H*_{SH}においてキンクが観測さ れた。これは超伝導相内部において、高磁場超伝導相への相転 移が起きていることを示しており、図2のH-T相図から、比熱 測定により得られた H*_{SH}は STM/STS 測定で得られた H*_{OPI}と 概ね一致することから、H > H*の高磁場相において空間的に不 均一な超伝導状態が実現しているものと考えられる。この状態 は超伝導ギャップが磁場方向に空間変調し、周期的にノード面 をもつ Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO)超伝導状態が実 現し、ノード平面が試料表面にピンされるような状態が生じて いるという解釈と矛盾しない。

- [1] S. Kasahara, et al., Proc. Natl. Acad. Sci. 111, 16309 (2014).
- [2] T. Shibauchi, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 89, 102002 (2020).
- [3] T. Watashige, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 86, 014 707 (2017).
- [4] T. Hanaguri, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 11pB12-12.



Fig.1: Field dependence of C/T at T = 0.5 K.



Fig.2: *H*-*T* phase diagram of FeSe under magnetic field applied parallel to *c*-axis.

分子モーター模型における運動論的非対称性と様々な効率

非線形動力学研究室 田口貴哉

Abstract Toward understanding the design principle of molecular motors, we study stochastic models with kinetic asymmetry by focusing on the two efficiencies based on thermodynamic and kinetic uncertainty relations. We find that the kinetic efficiency becomes optimal at a parameter value for a model of kinesin-1.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

分子モーターとは、主に化学エネルギーを力学的運動に変換するタンパク質の総称である。その中に は、細胞内で物質の輸送を行うキネシンや、生物のエネルギー源である ATP を合成する FoF1 と呼ばれ るものがある。このうちキネシンは ATP を加水分解して微小管の上を1ステップ(8nm)ずつ動く。FoF1 は Fo と F1 という部品から成っており、両者が回転することで ATP 合成反応を起こす。また、F1 は単独 で存在すると逆回転をして ATP を無駄遣いしてしまう。そのため F1 には、一方には回転しづらい機構 (整流機構)が備わっている[1]。このように、分子モーターは高い機能を持つナノマシーンである。

ところで、現在の分子モーターの姿や性能は、これまでの進化を経て出来上がったものである。した がって、分子モーターはそれぞれの役割で必要な機能を自然法則が許す範囲で最大化するように進化し てきたと予想できる。この機能を特徴づける量として、何らかの意味での「効率」が考えられる。本研 究では熱力学的不確定性関係(TUR)[2]と運動論的不確定性関係(KUR)[3]に基づく2つの効率に焦点を 当てた。TUR に基づく効率は「与えられたエントロピー生成率に対して、どれだけゆらぎを抑えつつ動 けるか」を、KUR に基づく効率は「与えられたアクティビティに対して、どれだけゆらぎを抑えて動け るか」を表す量であり、どちらも1を超えないことが示されている。よって、ある分子モーターの振る 舞いから計算したこれらの効率が1に近ければ、観察したモーターはその効率が表す機能を最適化する ように進化してきたと示唆される。また、キネシンはその遺伝子の類似性から15個のグループに分か れているが、「効率」という指標でその分類が特徴付けられるかもしれない。分子モーターの設計原理 をこのように解明するという目標を掲げ、分子モーターの数理モデルを解析した。

具体例のひとつは、2つの内部状態を切り替えながら1次元上を動くキネシンのモデル[4]である。こ のモデルでは、キネシンの ATP 分解サイクルが2段階に分けられる。1段階目でキネシンはその場で内 部状態を変化させ、2段階目で内部状態を変えるとともに1ステップ移動する。また、2段階目で前と 後ろに進む場合で違うパスを通って状態を変える。そして、1回の ATP 分解反応によってキネシンが獲 得するエネルギーをΔμとして、1段階目の遷移にはΔμcだけのエネルギーを割り当てる。さらに、熱を議 論するために状態間の遷移レートには局所詳細釣り合いを要請する。結局、このモデルにおいてキネシ ンの運動は、その構造に由来するパラメータを持つマルコフジャンプ過程で記述される。我々はパラメ ータをキネシンの実験から推定される値にとり、実空間と反応座標上での動きに関してそれぞれ TUR 効 率と KUR 効率を数値計算した。ただし、パラメータ推定に用いたキネシンは、kinesin-1というグルー プに属している。また、各パラメータをその推定値から変化させて同様の効率を計算した。

数値計算の結果、kinesin-1のパラメータでは TUR 効率も KUR 効率もその上限である1には達してい ない (高々0.58) が、パラメータ $\Delta \mu_c \varepsilon$ kinesin-1の値から変えていくと、化学反応に関する KUR 効率 が1に近づくパラメータ値が存在することが分かった。

さらに、第2の具体例として F1の整流機構を効率の観点から議論するためのモデルも解析した。

- [1] Y. Nakayama and S. Toyabe, arXiv:2008.07106 (2020).
- [2] A. C. Barato and U. Seifert, Phys. Rev. Lett. 114, 158101 (2015).
- [3] D. T. Ivan and B. Marco, J. Phys. A: Math. Theor. 52, 02LT03 (2019).
- [4] T. Ariga, M. Tomishige and D. Mizuno, Phys. Rev. Lett. 121, 218101 (2018).

近藤絶縁体 YbIr₃Si7における 磁性と中性フェルミオン励起

量子凝縮物性研究室 冨永貴弘

Abstract YbIr₃Si₇ is a newly discovered Kondo insulator which has two distinct antiferromagnetic phases. Low-temperature thermal conductivity and specific heat measurements revealed the presence of itinerant neutral fermions. Furthermore, we observed field-induced thermal metal-insulator/semimetal transition driven by the magnetic transition. These results suggest that spin degrees of freedom couple to the neutral fermions. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

近藤絶縁体は近藤効果によるf電子と伝導電子の混成によりフェルミ準位にギャップが形成される 絶縁体であり、近年YbB₁₂とSmB₆において様々な興味深い物性が報告され注目を集めている。例え ばトポロジカル表面状態の存在や[1]、絶縁相における量子振動の観測などがあげられる[2]。さらに興 味深いことに、YbB₁₂においては電気的中性のフェルミオン励起が熱伝導率測定から観測されており [3]、この起源と量子振動との関係について多くの議論を呼んでいる。一方で、SmB₆では電気抵抗の 量子振動が観測されておらず、また遍歴中性フェルミオン励起の存在についても共通の見解が得られ ていない。そのため、これらの違いを理解することは量子振動や中性フェルミオンの起源を理解する うえで重要であると考えられる。他の候補物質における検証が進めば、この問題について新たな知見

を得られる。しかしながら現存する近藤絶縁体は限られ、 系統的な研究が行われておらず、新しい候補物質の探索 が望まれていた。YbIr₃Si₇は最近発見された近藤絶縁体で あり、非磁性のYbB₁₂やSmB₆とは異なり4Kにおいて 磁気転移を示す[4]。したがって、YbIr₃Si₇は磁性と量子 振動や中性フェルミオン励起を調べるうえで非常に興味 深い系である。

今回我々は、YbIr₃Si7の低エネルギー励起を詳しく調べ るため、極低温磁場下で比熱と熱伝導率の測定を行った。 比熱の温度依存性の結果から、異なる2つの反強磁性相 AF-IとAF-II が存在することが示唆された(Fig.1)。さら に AF-I 相では、絶縁体であるにもかかわらず絶対零度極 限でそれぞれ温度に線形な、金属的な比熱と熱伝導率が 観測された(Fig.2(a))。熱伝導率においてはウィーデマ ン・フランツ則が強く破れており、YbB12と同様に遍歴 中性フェルミオンの存在が明らかとなった。また Fig.2(b) の上矢印で示すように、AF-II 相においては熱伝導率K/T が極低温で急激に減少する振る舞いが観測された。これ は、AF-I 相から AF-II 相にかけて熱的な金属一絶縁体(も しくは半金属)転移を起こしていることを意味する。2 つの相でスピン構造が変わっており、以上の結果は YbIr₃Si₇中の中性フェルミオンはスピンと強く結合して いるということを示唆している。



Fig.2 Temperature dependence of thermal conductivity κ/T in (a) AF-I and (b) AF-II.

- [1] M. Dzero et al., Annu. Rev. Condens. Matter Phys., 7, 249 (2016).
- [2] Z. Xiang *et al.*, Science, **362**, 65 (2018).
- [3] Y. Sato et al., Nature Physics, 15 954 (2019).
- [4] M.Stavinoha et al., arXiv:1908.11336.

空間反転対称性が破れた強相関電子系における 新奇超伝導相に関する理論研究

凝縮系理論グループ 柳瀬研究室 野垣康介

Abstract Motivated by recent fabrication of artificially engineered heavy fermion superlattices, we study superconductivity in the Rashba-Hubbard model. We employ fluctuation-exchange approximation to describe quantum critical magnetic fluctuations and resulting superconductivity. As a result, robust Fermi surfaces against magnetic fluctuations, incommensurate spin fluctuations, and a strongly parity-mixed superconducting phase are demonstrated.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

最近の研究展開として「空間反転対称性の破れ」という概念が様々な分野で注目され、華々しい発展 を遂げた。そこでは、電子の運動の自由度とスピンの自由度を結合させる「反対称スピン軌道相互作用 (ASOC)」が現れ、非自明な輸送特性や超伝導状態をもたらす。また、近年の技術発展により重い電子 系人工超格子 CeCoIns/YbCoInsの作製が可能となり[1]、そこでは、界面における空間反転対称性の破れ に誘起された ASOC が働く多層強相関電子系が実現していると考えられる。実際、バルクの CeCoIns は、 反強磁性 (AFM)量子臨界点近傍において Pauli極限の d 波の異方的超伝導が安定化し、各熱力学量にお いて非フェルミ液体的な振る舞いも報告されている強相関電子系である[2]。しかしながら、人工超格 子においては AFM 量子臨界揺らぎが抑制されること、Pauli 対破壊効果の抑制等の振る舞いが報告され ている[3]。これらの実験結果は空間反転対称性の破れの効果が物性に大きな寄与をしていることを示 唆している。

こうした背景より、本研究では空間反転対称性の破れた強相関電子系における超伝導相及びその発現 機構を明らかにすることを目的とした。ASOCにより結合した電子の運動とスピンの自由度に電子相関 が絡み合った非自明な量子臨界揺らぎとそれに駆動されるエキゾチックな超伝導相が期待できる。

以上の理由から、ASOC の作用する強相関電子系のミニマムモデルとして Rashba 型の ASOC の働く 正方格子上の Hubbard 模型を採用した。量子臨界揺らぎを定量的に取り扱える揺らぎ交換 (FLEX) 近似 を採用し、線形化 Éliashberg 方程式を用いて超伝導状態を評価した。これにより量子臨界揺らぎに対し て robust なフェルミ面、非整合な磁気揺らぎ、強くパリティ混成した超伝導状態が明らかとなった[4]。 本講演では主たる結果を紹介すると共に、本研究で明らかとなった強くパリティ混成した超伝導状態に よって期待できる物理現象も含めて議論する。



Fig. 1. Ratio of spin-singlet pairing and spin-triplet pairing as a function of the filling for U=2.4, 3.3, and 5. **References**

- [1] Y. Mizukami et al., Nature Physics 7, 849-853 (2011).
- [2] M. Shimozawa et al., Rep. Prog. Phys. 79, 074503 (2016).
- [3] S. K. Goh et al., Phys. Rev. Lett. 109, 157006 (2012).
- [4] K. Nogaki and Y. Yanase, Phys. Rev. B 102, 165114 (2020).

強い異方性を持つエアロジェル中における超流動 3He

凝縮系理論グループ 久光倫央

Abstract

The Anderson's theorem is shown to be satisfied in the polar phase of superfluid Helium-3 in strongly anisotropic aerogels. We examine the phase diagram and the energy gap by constructing more refined model. Also we investigate the stability of half-quantum vortex pairs, which appear as quantum vortices, against magnetic fields. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

超流動 3He の新奇相である Polar 相に関する 2 つの研究を行った。

1. 純粋な流体である P 波超流動 3He は、フェルミ面が等方的で対状態がほぼ縮退していることを反映して様々なタイプの対称性の破れを実現できる興味深い量子凝縮状態である。近年、一軸異方性を有するエアロジェルという媒質中の 3He で Polar 対状態が出現することが明らかになった[1]。さらに、散乱体である素線の方向が完全に揃った(異方性が強い極限の)構造では、Polar 対状態の熱力学量が(非磁性)不純物散乱効果を受けないことが分かった[2]。これは S 波超伝導における Anderson の定理のアナロジーとして理解される。例えば、比較的不純物散乱が強い系でも Polar 相の転移温度があまり下がらない実験結果[1]をよく説明する。本研究では、エアロジェルの強い異方性に対応するモデルを導入して、相図・エネルギーギャップの低温における振る舞いについて行われた実験の検証を行った[2]。 また、平面上の構造を持つ Planar エアロジェル[3] は Anderson の定理のアナロジーで ABM 対状態をサポートする。こちらもモデルを用いて同じように検証を行った。

2. エアロジェル中超流動 3He の Polar 相ではトポロジカル励起として半整数渦(HQV)対が出現する[4]。 HQV は渦一周につき d ベクトル・位相が共に半回転して一価性を保つ渦構造だ。HQV 対の観測は Polar 軸方向に垂直な磁場(以下:横磁場)を印加して NMR で行われた。ところが、横磁場をどの温度で印加す るかで観測される渦の種類が異なるという実験結果が報告された[5]。横磁場を超流動転移「前」から 印加し続けるか、転移「後」に印加するかで整数渦(SQV)/HQV 対の二種類の渦糸が観測されている。NMR で用いる程度の大きさの磁場で渦構造が変わるというのは非常に興味深い。本研究では、磁場・双極子 相互作用を共に含む Ginzburg-Landau 自由エネルギーを用いた数値計算の結果を、不純物による渦糸ピ ン止め効果の定性的な評価に基づいて考察し、HQV 対に対する磁場の影響とその結果起こる HQV 対不安 定化のメカニズムを明らかにした。また、未だ実現していない chiral A 相 HQV 対に関して Planar エア ロジェル中[3]におけるカイラリティと渦度の相関についても指摘する。





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

- [2] T. Hisamitsu, M. Tange, and R. Ikeda. Phys. Rev. B 101, 100502(R) (2020)
- [3] V.V. Dmitriev et al. Phys. Rev. B 102,144507(2020)
- [4] S. Autti et al. Phys. Rev. Lett. 117, 255301 (2016)
- [5] S. Autti et al. Phys. Rev. Research. 2, 033013 (2020)

2次非線形光学過程を用いた 赤外量子もつれ光子対発生と検出

光物性研究室 北條真之

Abstract: In this work, we have investigated generation and detection scheme of infrared entangled photons for quantum sensing. Simultaneous parametric down-conversion process was demonstrated a broadband generation scheme of infrared entangled-photon pairs. We also constructed the up-conversion detecting system with the quantum efficiency 1% for counting the infrared photon number.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

古典的計測手法の問題や限界を克服する新規な技術として、量子もつれ光子対を用いた量子計測が注 目されている。特に、赤外光の直接検出なしに赤外分光を行う量子赤外分光法(Quantum infrared spectroscopy; QIS)は、赤外域における技術的制約を解決する方法として着目されている。しかし、発 生に用いられる自発パラメトリック蛍光(SPDC)は発生帯域の狭さや波長選択性の乏しさなど、発生 条件(位相整合条件)に厳しく制限された問題を抱える。また、赤外もつれ光子対の量子性が利用され ているにも関わらず、赤外もつれ光子対自体の量子性を直接的に観測したという報告もない。この背景 には、熱雑音などの背景放射により赤外光子数計測可能な半導体検出器がないことが挙げられる。

本研究の目的は、赤外域におけるもつれ光子対の量子性の評価を行うことである。そこで、上記で挙 げた問題点を解決するため、① SPDC の広帯域化・波長可変化、② 高感度な赤外光検出系の構築、を 目指した。①において、SPDC を簡便に広帯域化する手法を模索した結果、図1に示すように特定の条 件で2組の光子対が同時に発生するような解が存在することを明らかにした。これにより、簡便な実験 系で2~5 µm の広い赤外帯域における SPDC のアイドラー光発生の可能性を示した。さらに、実験的検 証として、SPDC ポンプ光として波長 0.638 µm の光源を用いた場合の光子対のうち、赤外アイドラー 光と対応する可視域に発生したシグナル光の 0.72-0.78 µm をカバーするスペクトルを観測した。これ により、赤外アイドラー光として 3.5-5.6 µm の広帯域な赤外光の発生可能性を実験的に示した。②に関 しては、高強度なレーザー光を用いたアップコンバージョン過程により、赤外光を高い変換効率で可視 光に変換することで、可視域における光子数計測器が利用可能なことに注目した。理論計算により、既 存のレーザー光源にはない性能を有する光源を用いることにより、量子効率10%を超える変換が可能 であることがわかった。そこで、ファイバーベースの高強度パルスレーザーを自作し、アップコンバー ジョン系に組み込むことで、高変換赤外光検出系を設計した。実験的検証として、連続波量子カスケー ドレーザー(QCL)を赤外光源に用いて変換効率を評価し、変換効率が1%であることを確認した。

この検出系をさらに改善することで量子効率10%以上を目指し、①において明らかにした広帯域赤 外アイドラー光を観測する、さらには光子数計測を行うことで量子的な性質の実験検証を行うことが今 後の課題である。



Fig.1 Conceptual diagram of two simultaneous SPDC processes. From the incident pump light, two SPDC photons simultaneously produced in the same QPM condition, in which signals are generated in the visible region and idlers in the IR region.

References

[1] D. A. Kalashnikov et al., Nature Photon, 10, 98-101 (2016).

コロイド粒子とラメラ相との動的結合

ソフトマター物理学研究室 吉岡真吾

Abstract We investigated the dynamic coupling between undulation fluctuation of lamellar and Brownian motion of colloidal particles in the water solution by DLS. The relaxation frequency of the undulation fluctuation become small by mixing of colloidal particles. It means that colloidal particles inhibit the direct collisions of adjacent lamellar, then the layer compression modulus was reduced. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

C12E5 水溶液は幅広い濃度域でラメラ相を形成し、濃度の 低下とともに層間は可視光の波長域まで膨潤することが知ら れている。さらに、膜間距離より小さい直径の荷電コロイド 粒子を加え、電場を印加してコロイド粒子を振動運動させる と、コロイド粒子の振動振幅と周波数に依存してラメラの層 構造が変化することがわかっている [1]。本研究では動的光 散乱法を用いてラメラとコロイド粒子混合系のダイナミクス を測定し、ラメラの波うち揺らぎとコロイド粒子のブラウン 運動の動的結合の研究を行った。

C12E5 水溶液φ=6wt%が作るラメラ相に荷電コロイド粒子 (直径 R=20nm)水溶液Φ=0.15wt%を加えた混合溶液を、動的光 散乱法(DLS)を用いてその分散関係を測定した。φ=6wt%では、 ラメラ相の膜間距離は 62.5nm と見積もられ、コロイド粒子の 直径の3倍程度である。測定結果は、Φ=0.15wt%の純粋なコロ イド粒子懸濁液で観測されるコロイド粒子のブラウン運動、お よびφ=6wt%の C12E5 水溶液におけるラメラ相の波うち揺らぎ の分散関係と比較し、コロイド粒子濃度Φ依存性についても確 認した。

混合系の自己相関関数には、二種類の緩和モードが観測された。これらはそれぞれ、コロイド粒子のブラウン運動とラメラ 相の波うち揺らぎと考えられる。混合系の2つのモードの分散 関係をそれぞれ、純粋なコロイド粒子のブラウン運動の分散関 係、純粋なラメラ相の波うち揺らぎの分散関係と比較すると、 コロイド粒子のブラウン運動は、混合系においてもほぼ変化が なかったものの、ラメラ相の波うち揺らぎは、コロイドの混合 により減速することがわかった。さらに、コロイド粒子濃度Φ 依存性の測定から、Φが大きいほどラメラ相の波うち揺らぎは 大きく減速していることがも確認された。

コロイド混合系におけるラメラの波うち揺らぎの減速は、 コロイド粒子が膜間に存在することにより、隣接する膜同士 の直接衝突が阻害され、膜間の立体障害力が弱められて層圧 縮弾性率が低下したものと理解できる。

References

[1] J. Yamamoto and H. TANAKA. Dynamic control of the photonic smectic order of membranese, Nature Materials, 4, 75 (2005).



Fig. 1 Autocorrelation function of mixture. There are two relaxation mode. Fast mode is Brownian motion of colloidal particles, and slow mode is undulation of lamella phase.



Fig. 2. Dispersion relation of water solution of pure colloid particles, pure lamella phase, and the mixture.



Fig. 3. Colloidal concentration dependency of Diffusion constance.

密度行列くりこみ群による スピン1近藤ハイゼンベルク鎖の解析

物性基礎論:凝縮系物理研究室 增井陸

Abstract Both the robustness of string order of S=1 Heisenberg model against the Kondo interaction between spin chain and electron system and the generalization of ordinary S=1/2 Kondo lattice model can be studied through S=1 Kondo-Heisenberg chain. We studied this model by the perturbation theory under the condition where Kondo coupling is strong and by the numerical method of Density Matrix Renormalization Group (DMRG).

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

伝導電子と規則的に並んだ局在スピンとの相互作用 *J_x*を考える近藤格子模型[1]は重い電子系の物理 を理解するための基本的なモデルである。近藤格子模型において局在スピンを *S=1*とし、さらに局在ス ピン間に直接的な相互作用 *J_x*を入れた模型がスピン1近藤ハイゼンベルク鎖である。(Fig. 1.)

$$H_{KH} = -t \sum_{i} \sum_{\sigma \in \uparrow,\downarrow} \left(c_{i,\sigma}^{\dagger} c_{i+1,\sigma} + \text{H.C.} \right) + J_K \sum_{i} s_i \cdot S_i + J_H \sum_{i} S_i \cdot S_{i+1}$$

摂動論を用いた解析的手法と密度行列くりこみ群[2]による数値的手法でこのモデルの基底状態の性質 を調べた。

 $J_x \to \infty$ の極限では伝導電子と *S=1*の局在スピンが形成するダブレットがスピン自由度をもつため、近藤シングレットを形成する通常の近藤格子模型とは異なる基底状態が実現する。伝導電子の数が系のサイト数と同じ場合、 $J_x \to \infty$ の極限からの摂動論により、有効ハミルトニアンはスピン 1/2 の反強磁性ハイゼンベルク鎖になる。一般の占有率では、ダブレットの持つスピン自由度により J_{k}/t が大きい場合での伝導電子の運動の磁性への寄与の仕方が通常の近藤格子模型と異なるものの $J_{tt}/t=0$ の場合には通常の近藤格子模型の場合と同じく基底状態が強磁性であることが分かった。さらに伝導電子の数が系のサイト数の半分の場合に $J_{tt} < J_{tt}/t=0$ から大きくしていったとき $J_{tt}/t=0$ での強磁性秩序が J_{tt} による反強磁性的なスピン交換との競合の結果失われ、フェリ磁性、反強磁性へと変化することが密度行列くりこみ群による計算で分かった。

他方で、スピン1近藤ハイゼンベルク鎖は見方を変えるとスピン1反強磁性ハイゼンベルク鎖に伝導 電子系を結合させたものと見なせる。そこでスピン1反強磁性ハイゼンベルク鎖がもつストリング秩序 の伝導電子系との相互作用の下での耐性を調べるために、今度は *J_k を J_k/t*=0 から徐々に大きくしてい ったとき、密度行列くりこみ群で計算した基底状態における局在スピン間のストリング秩序変数を計算 したところ臨界値 *J_k* に向かって減衰することが分かった。(Fig. 2.)





Fig. 1. Kondo-Heisenberg model. Green rounds describe local spins, and red ones conduction electrons.

Fig. 2. Decrease of hidden string order in localized S=1 spin.

- [1] H. Tsunetsugu, M. Sigrist, and K. Ueda, Rev. Mod. Phys. 69, 809 (1997).
- [2] S.R. White, Phys. Rev. Lett. 69 (1992) 2863.

Kitaev 磁性体 α-RuCl₃の薄膜作製

量子凝縮物性研究室 井伊崇仁

Abstract It has been suggested that atomically thin films of the Kitaev magnet are important to detect non-Abelian anyons, but thin film growth of α -RuCl₃ has never been reported. Here, we report the fabrication of α -RuCl₃ and CrCl₃ thin films by pulsed laser deposition. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

スピン系において、強い量子揺らぎにより絶対零度まで長距離秩序や対称性の破れを示さない特殊な 状態は量子スピン液体と呼ばれる。2006年にA. Kitaevにより二次元ハニカム格子で量子スピン液体を 記述する模型が提案された[1]。この模型は量子多体スピン系であるにも関わらず、基底状態が厳密に 求まる量子スピン液体となることが知られている。Kitaevスピン液体状態の励起状態では、電子スピン が分裂し局在マヨラナ粒子によって構成される Z₂ 渦と遍歴マヨラナ粒子が現れる。これらの複合粒子は 特殊な統計性を持つ非可換エニオンであり、トポロジカル量子計算において基本的な役割を担うことか ら大きな関心を集めている。

Kitaev スピン液体の候補物質として、強いスピン軌道相互作用を持つモット絶縁体 α -RuCl₃ が注目を 集めている。 α -RuCl₃ はゼロ磁場において $T_N = 7 \text{ K}$ でジグザグ型の反強磁性秩序を示すが、面内磁場に よりこの反強磁性秩序は完全に抑制されスピン液体状態が実現する。この磁場誘起スピン液体領域にお ける熱ホール効果測定から、熱ホール伝導度がプラトーを示し、その値が整数量子ホール効果で期待さ れる値の半分になる「半整数熱量子ホール効果」が観測された[2]。これは、遍歴マヨラナ粒子のカイ ラルエッジ流ならびに非可換エニオンの存在を示す強力な証拠である。単層膜での走査型トンネル顕微 鏡(STM)や走査型トンネル分光法(STS)によって、この非可換エニオンを直接検出できる可能性が指摘 されているものの[3-5]、単層膜の作製技術が確立しておらず、検出実験の報告はない。

そこで今回我々は、パルスレーザー堆積法による α-RuCl₃薄膜作製を試みた。この手法を用いること で、STM 測定に用いることができ、かつキャリアドーピングのための電界効果デバイスなどに適用でき る大面積の薄膜の作製を目指した。サファイア基板上への蒸着においては、Ru と Cl の組成比は単結晶 と近く、表面には結晶核らしきものがみられたものの、エピタキシャルな結晶成長は見られなかった。 一方で α-RuCl₃単結晶上へのホモエピタキシャル成長は可能であった。そこで類似化合物である CrCl₃ に着目し合成を行った。この物質は、α-RuCl₃ と同じ結晶構造を取り格子定数も近いため、バッファ層 として利用することで基板と格子定数のマッチングの向上が期待できる。また磁性基板として利用する ことで、強磁性体による近接効果の研究へ応用可能である。合成の結果サファイア基板上に多数の単結 晶が得られ、何らかの結晶成長を確認することができた。

- [1] A. Kitaev, Ann. Phys. **321**, 2-111 (2006).
- [2] Y. Kasahara et al., Nature, 559 227-231 (2018).
- [3] J. Feldmeier et al., Physical Review B 102, 134423 (2020).
- [4] M. Udagawa et al., arXiv:2008.07399
- [5] E. J. König et al., Physical Review Letters 125, 267206 (2020).

球面の表面張力における曲率依存性と 有限サイズ効果

非平衡物理学研究室 池田圭吾

Abstract Tolman length represents the curvature dependence of interface tension. In computing it by simulation, it is crucial to estimate finite-size effects. We derive the size and curvature dependence of the interface tension by extending the flat interface argument to the spherical case and compare the results with previous research.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

表面(界面)張力は界面における単位面積当たりの自由エネルギーであるが、界面が球面の場合、球の半径に依存する。半径 *R* のときの表面張力をγ(*R*)とするとき、ラプラスの方程式

$$\Delta P = \frac{2\gamma(R)}{R} (\Delta P \ddagger 2 つの相の圧力差)$$

が成り立つように分割面をとると、R が十分大きいとき、

$$\gamma(R) = \frac{\gamma_{\infty}}{1 + \frac{2\delta}{R}}$$
 (γ_{∞} は界面が平面の場合の表面張力)

のように変化する。 δ は Tolman 長[1]と呼ばれ、核生成ダイナミクスや結晶の形に影響を及ぼすが、これを実際に測定することは困難である。

Tröster らはイジングモデルを用いたシミュレーションで、大きな有限サイズ効果を見出した[2]。大きさ L の d 次元の箱の中にある半径 R の球面に対する表面張力 $\gamma_L(R)$ は、密度 ρ に対する自由エネルギー密度を $f_L(\rho)$ とすると、

$$\beta \gamma_L(R) A = L^d f_L(\rho) - V_\alpha f_L(\rho_\alpha) - V_\beta f_L(\rho_\beta)$$

から計算される。ここで ρ は系全体の密度、 $\rho_{\alpha}, \rho_{\beta}$ は各相の密度、 V_{α}, V_{β} は各相の体積を表し、Aは界面の 面積である。Tröster らは $\gamma_L(R)$ の $L \rightarrow \infty$ のときの振る舞いが、

$$\beta \gamma_L(R) = \beta \gamma^T(R) - d \frac{\ln L}{A} + \frac{C}{A}$$
 (CはL,Rに依らない定数) (1)

であると仮定して解析を行った。第2項は界面の位置の自由度によるエントロピー変化を表す。球を作る相が液相の場合と気相の場合とで、Tolman 長 δ の絶対値は一致すべきだが、式(1)に基づく Tröster らの計算では異なっている。

我々はその原因は界面のゆらぎが適切に取り入れられていないためだと考えた。界面が平面の場合に は表面張力波の効果などを取り入れた計算が存在し[3]、シミュレーションとの一致も確認されている [4]。同じような効果を考慮した場合、γ_L(**R**)は境界条件で決まる定数*C*_L, *C*_Rを用いて

$$\beta \gamma_L(R) = \beta \gamma(R) + C_L \frac{\ln L}{A} + C_R \frac{\ln R}{A} + \frac{C}{A}$$
 (CはL, Rに依らない定数)

の形の有限サイズ効果が期待される。実際我々の計算では、 $C_L = -d, C_R < 0$ であれば、Tröster らの δ の振る舞いについて説明することが可能となる。

本研究では、界面が平面の場合のゆらぎの議論を球面の場合に拡張して、球面の表面張力における有 限サイズ効果と曲率依存性を導出する。また、それを先行研究と比較することによりその妥当性につい て議論する。

References

[1] R.C.Tolman, J. Chem. Phys. 17, 333 (1949).

- [2] A Tröster, F. Schmitz, P. Virnau, and K. Binder, J. Phys. Chem. B, 122, 3407–3417(2018)
- [3] U.Wiese, arXiv:hep-lat/9209006 (1992).
- [4] F. Schmitz, P. Virnau, and K. Binder, Phys. Rev. E 90, 012128 (2014)

グラフェンにおけるテラヘルツ磁気分光

光物性研究室 江口航平

Abstract We performed magneto-spectroscopy of monolayer graphene electric field effect transistor. using continuous terahertz wave. Quantum oscillations of magnetoresistance was confirmed at 4.2K. No Kerr rotation was observed below 1 THz, whereas the reduction of the magnetoresistance at charge neutral point was observed under terahertz irradiation presumably due to carrier excitation. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

炭素原子が蜂の巣格子状に配列する層状物質であるグラフェンに面直に磁場を印加すると、サイク ロトロン運動が量子化され、離散的なエネルギー構造(ランダウ準位)は発現する.バンドが2次曲線で 近似される通常の半導体2次元電子系ではエネルギー準位が等間隔に配列するのに対し、グラフェンは 伝導帯と価電子帯が接するディラック点近傍ではバンドが線形で近似されることを反映して、非等間 隔に配列する[1].ランダウ量子化したグラフェンにおいてはこれまで直流領域における半整数量子ホ ール効果が観測されていたが、近年光の周波数領域(テラヘルツ領域)においても光学ホール伝導度が プラトー構造をとることが計算により予測され[2]、テラヘルツ時間領域分光法を用いた実験では古典 的なドルーデモデルから測定値がずれることから、プラトー構造をとることが示された[3].

我々は、グラフェンにおけるランダウ準位間遷移を詳細に調べるために、光源に狭線幅連続波テラ ヘルツ光源を用いた反射型テラヘルツ偏光分解磁気光学システムを構築した.標準試料 DPPH を用いた 光学系の評価により、検出可能な最小スピン数は*Nmin*~3x10¹⁷、検出感度は2x10¹⁶ spins/mT,角度分解能 は10 mradと見積もられた.図1に偏光分解測定の概念図を示す.直線偏光したテラヘルツ光をランダウ 量子化したグラフェンに照射すると、ランダウ準位間の光学遷移により左右円偏光に対する屈折率に違 いが生じて、反射光の偏光面は回転する.偏光回転角 *θ*_Kはホール伝導度を反映しているためこれを測定 することにより量子ホール状態を光の周波数で観測できる.試料には単層グラフェン電界効果トランジ スタを使用し、ゲート電圧によりフェルミレベルを操作可能にした.図2に4.2 K, *B*=5 T において伝導測 定により取得した試料の磁気抵抗のゲートバイアス依存性を示す.電荷中性点(*V*g=2 V)を挟んで非対称 なゲートバイアス依存性が観測された.電荷中性点より低い電圧領域(ホールキャリア領域)では量子振 動が観測された.テラヘルツ反射測定においては偏光面の回転は観測できなかった.これは偏光面の回 転角が角度分解能を下回っているために検出できなかったと考えられる.また、テラヘルツ光照射下で の伝導測定により、電荷中性点付近で磁気抵抗が減少するふるまいが見られた.これはテラヘルツ光に よる光励起が起きているためであると考えられる.



Fig 1. Terahertz polarization resolved magneto-spectroscopy.

- [1] M. Goerbig, Rev. Mod. Phys. 83, 4 (2011).
- [2] T. Morimoto et al., Phys. Rev. Lett. 103, 116803 (2009).
- [3] R. Shimano et al., Nat. commun. 4, 1843 (2013).



Fig 2. Gate bias dependence of magnetoresistance measured at 4.2K, B=5 T.

Estimating a self-excitation kernel from a series of events

Non-linear dynamics group

Luis Iván Hernández Ruíz

Abstract In self-exciting processes, past events facilitate the occurrence of future events. We developed a method for estimating the future influence that one event has exerted and the reproduction number of the process from the autocorrelation function and the Fano factor of a given series of events. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

Self-exciting processes describe phenomena in which past event-occurrences facilitate the occurrence of future events, as seen in the spread of the Covid-19 disease. In 1971, Alan Hawkes proposed a mathematical model that represents the manner in which the rate of event-occurrence $\lambda(t)$ is increased due to the occurrences of past events:

$$\lambda(t) = \rho + R \sum_{t < t_i} h(t - t_i)$$

where ρ is a baseline rate of spontaneous occurrence, *R* is the reproduction number, representing the average fraction of additional events generated by one event, and h(t) is a normalized kernel function representing the temporal influence of one event, which has occurred at the time t_i , is transmitted to future times. The above expression can be utilized for simulating an event series; however, it has been shown that the kernel function can be estimated from the data of a given spike train by solving an integral equation that involves the autocorrelation function of the spike train [2, 3].

In the present study, we have improved existing methods in two ways. Firstly, we improved on estimating the autocorrelation from a given event series. This was done by selecting an optimal bin size when constructing spline polynomials to connect the mid-points of bar histograms. Secondly, we improved on estimating the kernel from the autocorrelation. This was done by solving the integral equation using a Reproducing Kernel Hilbert Space method [4]. Furthermore, we discovered that the reproduction number R can be estimated independently from the Fano factor of the spike train. The independent estimation of the reproduction number was used to validate the estimation of R performed by integrating Rh(t).

Our method was superior in performance to existing methods [2]. Finally, we applied our method to spike trains obtained from biological neuron data.



Fig 1. Estimation performed on an exponential kernel. (a) Existing method. (b) Our method.

- [1] A. G. Hawkes. Biometrika, 58(1):83-90,04 1971.
- [2] E. Bacry and J. Muzy. IEEE Transactions on Information Theory, 62(4):2184-2202,2016.
- [3] T. Onaga and S. Shinomoto. Physical Review E, 89(4):042817, 2014
- [4] T. L. A. Alvandi and M.Paripour. Journal of Hyperstructures, 5(1):56-68, 2016.

2次元2成分量子乱流減衰過程における渦クラスタ構造

流体物理学研究室 大西祐介

Abstract We numerically investigate behavior of the quantum vortices with the two-component twodimensional Gross-Pitaevskii equation. We find that clusters do not appear when the intercomponent interaction is strong. We also associate the number of vortices with the intercomponent interaction coefficient.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

絶対零度における希薄な冷却原子気体の巨視的波動関数は Gross-Pitaevskii 方程式により記述されることが 知られている。近年、量子流体において Kolmogorov の –5/3 乗則が観測されて以降、量子乱流と古典乱流の 類似性に着目した研究に関心が集まっている。Onsager によると点渦モデルにおいては負温度が実現し、この とき点渦がクラスタ化するということが提唱されている [1]。また実際に1成分量子系において数値計算や実験 でこれは確かめられている [2]。量子系でのこのような現象は2次元古典乱流において大規模構造が出現するこ とと対応付けられている。一方で2成分系において Gross-Pitaevskii 方程式は、

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi_i(\boldsymbol{r},t) = \left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(\boldsymbol{r}) + g|\psi_i(\boldsymbol{r},t)|^2 + g_{12}|\psi_{3-i}(\boldsymbol{r},t)|^2\right)\psi_i(\boldsymbol{r},t)$$

となる。ここで r は空間、t は時間、 $\psi_i(i = 1, 2)$ は巨視的波動関数、V(r) はポテンシャル、m は原子質量、 g, g_{12} は結合定数、 \hbar は Dirac 定数、i は虚数単位を表す。この g_{12} の項により渦の振る舞いはさらに複雑にな り、また減衰過程で多量の渦が消滅する [3]。そのため渦のクラスタ化に関して定量的な結果は得られていない。

そこで本研究ではまず円形境界に束縛された2成分系における「点渦」モデルを用いて、負温度状態になる 点渦の配置を求めた。この点渦の配置を波動関数に刷り込むことで初期の波動関数を生成し、これを2成分 Gross-Pitaevskii 方程式に従って発展させた。このようにして得た波動関数に対して、その渦の位置と符号を検 出し、それらを Fig.1(a) に示すように渦対とクラスタに分類した。またこの渦配置に対してクラスタ率を導入 することで、渦のクラスタ化を定量的に観測した。さらに成分間の相互作用の大きさによって渦の減少を特徴づ けるために渦の個数の時間発展を追い、統計的準定常状態における渦の個数を得た。

このような方法を用いることで、渦のクラスタ化については成分間の相互作用が強くなるところでクラスタ は形成されにくくなるという結果が得られた。また渦の個数について統計的準定常状態での渦の個数 N_{QS} は Fig.1(b) に示すように、成分間相互作用係数の大きさが強くなることで少なくなっていくことが得られた。こ のような減少が渦の回復長の大きさに依存するとして得た理論値との比較を行い、成分間の相互作用係数の大き い領域では良い一致を示すことが得られた。



Fig.1 (a) A classification of detected vortices. The background is the density distribution. White dots are vortex pairs, red dots are positive vortices, and blue dots are negative vortices. Identified clusters are drown with red and blue lines. (b) The inter-component interaction(g_{12}) dependence of the number of vortices(N_{QS}) in statistical quasi-equilibrium and its theoretical value.

- [1] L.Onsager, Nuovo Cimento 6, 279 (1949)
- [2] G. Gauthier, M. T. Reeves, X. Yu, A. S. Bradley, M. A. Baker, T. A. Bell, H. Rubinsztein-Dunlop, M. J. Davis, and T. W. Neely, Science 364, 1264 (2019)
- [3] J.Han and M.Tsubota. Phys. Rev. A 99, 033607 (2019)

相互作用のある対称性保護トポロジカル相の 非自明相における一般化された Thouless ポンプについて

基礎物理学研究所・凝縮系 大山修平

Abstract. We study the space of short-range entangled states and the ground state line bundles over them. To determine the topology of the space and the holonomy of the line bundle over it, we study the matrix product state and its algebraic structure. We obtain a non-trivial fermion parity pump and holonomy associated to the line bundle.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

時空d+1次元 Short Range Entangled(SRE) 状態とは「任意の空間d次元多様体上で gapped かつ unique な基底状態を持つハミルトニアンの基底状態として実現される状態」のことである.時空d+1次元の SRE 状態全体の集合を $\mathcal{M}_{|0\rangle}^{d+1}$ と書くことにする.ここで $|0\rangle$ は SRE 状態の空間の適当な基点であり,通常は真空ベクトルをとる.近年のトポロジカル相やアノマリーの研究によって以下のような $\mathcal{M}_{|0\rangle}^{d+1}$ の幾何学的構造を調べることの物理学重要性が明らかになってきた:

(1)SRE 状態の持つ重要な性質は,SRE 状態を連続変形で同一視した場合,状態のテンソル積に関して逆元 が存在することである (i.e. $|\chi\rangle \otimes |\bar{\chi}\rangle \sim |0\rangle \otimes |0\rangle$).従って $\mathcal{M}^{d+1}_{|0\rangle}$ の連結成分 $\pi_0(\mathcal{M}^{d+1}_{|0\rangle})$ にはテンソル積に 関する群構造が入り,この群によって時空 d+1 次元の SRE 状態を分類することができる.SRE 状態を連 続変形で同一視したものは Symmetry Protected Topological(SPT) 相と呼ばれており $\pi_0(\mathcal{M}^{d+1}_{|0\rangle})$ で分類される.

(2)Kitaev は SRE 状態の空間が $\Omega \mathcal{M}_{|0\rangle}^{d+1} \sim \mathcal{M}_{|0\rangle}^{d}$ という関係を満たすことを予想した [1]. ここで Ω は $\Omega X_* = \{\gamma: [0,1] \rightarrow X_* | \gamma(0) = \gamma(1) = *\}$ で定義し、~は homotopy 同値を表す.これは次にような物理的考察に基づく. 時空 d 次元の自明な SRE 状態 $|0\rangle_d \in \mathcal{M}_{|0\rangle}^{d}$ を一次元的に並べた状態は、時空 d+1 次元の自明な SRE 状態 $|0\rangle_{d+1} \in \mathcal{M}_{|0\rangle}^{d+1}$ を定める.次に任意の時空 d 次元 SRE



状態 $|\chi\rangle \in \mathcal{M}_{|0\rangle}^{d'}$ をとる. これに対して次のような $\mathcal{M}_{|0\rangle}^{d+1}$ Figure 1: A construction of a generalized Thouless pump. 内のループを構成することができる (Fig.1). $\Omega \mathcal{M}_{|0\rangle}^{d+1}$ の元は時空 d+1 次元の一般化された Thouless ポンプを 与える. 従って一般化された Thouless ポンプは $\pi_0(\Omega \mathcal{M}_{|0\rangle}^{d+1}) \simeq \pi_1(\mathcal{M}_{|0\rangle}^{d+1})$ で分類される. また $\pi_1(\mathcal{M}_{|0\rangle}^{d+1}) \simeq \pi_0(\mathcal{M}_{|0\rangle}^{d})$ より時空 d+1 次元の一般化された Thouless ポンプは d 次元の SPT 相によって分類されることが 期待される. しかしながら Kitaev の予想は未だ証明されておらず,特に相互作用のある系に対しては直接 的検証がなされていない.

(3) 各点 $|\chi\rangle \in \mathcal{M}_{|0\rangle}^{d+1}$ における fiber が $\mathcal{L}_{|\chi\rangle} = \{\mathbb{C}|\chi\rangle\}$ で定義される複素直線束 $\mathcal{L} \to \mathcal{M}_{|0\rangle}^{d+1}$ を考える. \mathcal{L} に は自然な接続 \mathscr{A} が入ることが知られており, $(\mathcal{L}, \mathscr{A})$ の同型類 $[\mathcal{L}, \mathscr{A}]$ は時空 d 次元のアノマリーを分類す ることが知られている [2].

相互作用のある SRE 状態を扱うのは一般に困難であるが,時空1+1次元に限れば Matrix Product State(MPS) と呼ばれる強力な解析手法が存在し,系の持つ性質を代数的に特徴付けることができる [3].

本研究ではフェルミオンに対する MPS を用いて時空 1+1 次元 SRE 状態の空間 $\mathcal{M}_{|0\rangle}^{1+1}$ の幾何学的構造を 具体的に解析した. これによって相互作用のある SRE 状態に対して非自明相における fermion parity ポン プの存在を確かめた. これは Kitaev 鎖の非自明相における fermion parity ポンプの一般化と言える. また $\mathcal{L} \to \mathcal{M}_{|0\rangle}^{1+1}$ を具体的に構成し, holonomy の計算を行って [\mathcal{L}, \mathcal{A}] の構造を決定した.

References

[1]Kitaev, "On the classification of short-range entangled states." Talk at Simons Center (2013).

- [2]X.-z. Dai and D. S. Freed, J.Math Phys. 35 (1994) 5155-5194.
- [3]Bultinck, et.al., Phys. Rev. B 95, 075108 (2017).

制限ボルツマンマシンと1次元量子相転移の研究

物性基礎論:凝縮系物理 尾田直人

Abstract The Cluster-Ising model is an exact solvable model of spin-1/2. For this model, we solve the ground state assuming quantum states can be expressed by artificial neural network quantum state and see if we could detect a quantum phase transition. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

近年注目を浴びているトポロジカル相をはじめ物理系では、基底状態を求めることは重要な問題である。ただ一般に、システムサイズが増加するにつれてヒルベルト空間の次元は指数関数的に増大するためハミルトニアンを対角化することは困難になる。

機械学習の分野で古典確率分布を再現するものとして導入された制限ボルツマンマシン (Restricted Boltzmann Machine; RBM)の概念はCarleoとTroyerによって量子多体系の問題に適用さ れた[1]。古典確率分布の場合、制限ボルツマンマシンは実際の自由度に対応する可視層と隠れ層から なる二層のグラフ上の関数を考え、この関数から隠れ層の自由度をトレースアウトして得られる関数を 狙いの古典確率分布に近づけるようにパラメータを最適化する。量子多体系に適用するにあたり、 CarleoとTroyerは波動関数を物理自由度に対する確率分布のようなものとして考えたがその場合、波 動関数は一般に複素数に値をとるため古典のときとは異なりパラメータを実数から複素数に拡張する 必要がある。

RBM では隠れ層のサイトの数をN程度にとることでパラメータの数をNの多項式程度に抑えることができるので、通常の波動関数の表現におけるヒルベルト空間の次元の指数関数的な増大と比べて効率よく表現している。隠れ層のサイトの数を増やすことで状態を近似する能力が上がることが期待されるが、どれほど状態を近似できるかについては未知な部分もある。

本研究ではトポロジカル相転移を示す厳密に解 ける模型の1次元のクラスター・イジング模型[2,3] について RBM を用いて調べた。まずこの模型につい て、RBM 型の波動関数を仮定し、この波動関数につ いてパラメータを最適化して基底状態を求めた。実 際にパラメータを増やしてどれほど基底状態のエネ ルギーが改善するかをみたものが Fig.1 である。パ ラメータを増やすにつれて厳密に知られている基底 状態に近い値に収束していることがわかる。次に、 この基底状態について秩序変数を計算することで量 子相転移を実際に検出出来るかどうかをみた。その 結果、おおよその相転移点を決めることができた。



Fig.1. RBM ground-state energy at each step of the optimization. Alpha is the ratio of the number of sites in hidden layer to that in visible layer.

References

[1] G. Carleo and M. Troyer, Science 335, 602 (2017).

[2] P. Smacchia, L. Amico, P. Facchi, R. Fazio, G. Florio, S. Pascazio, and V. Vedral, Phys. Rev. A 84, 022304 (2011).

[3] W. Son, L. Amico, R. Faizo, A. Hamma, S. Pascazio and V. Vedral, Europhy. Lett. 95, 50001 (2011).

Cu₂Oにおける励起子の和周波分光

光物性研究室 片桐佳来

Abstract We have observed blue and violet excitons in Cu_2O by the sum-frequency-generation (SFG) spectroscopy using a broadband light source. It was revealed that resonant energies of 2 photon-SFG and 3 photon-SFG are different. The energy difference was explained by the exciton polariton dispersions calculated including a large damping term.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

半導体中では、電子とホールがクーロン引力により束縛されて励起子が形成される。励起子は電気的 に中性の準粒子であるが、発光や吸収といった光学応答に大きな影響を与えるだけでなく、様々な応用 が期待されている。中でも亜酸化銅(Cu₂O)の励起子系列の一つである黄色励起子では近年、有効ボーア 半径が1 µmを超える巨大 Rydberg 励起子が観測された[1]ことをきっかけに、励起子を用いる単一光子 源や光スイッチなどが提案された。また、この黄色励起子系列と、他系列である青・紫色励起子の間の 遷移を利用するコヒーレント現象の探索の理論提案もあり[2]、Cu₂Oの励起子に対する注目が高まって いる。しかし、減衰の大きな青・紫色励起子と光子とが結合した励起子ポラリトンの振る舞いについて は詳しく知られていない。

そこで本研究では、高強度の光を物質に照射した際に入射光の定数倍の周波数を持つ光が発生する和 周波発生(SFG)という現象を用いて Cu₂O の青・紫色励起子を観測し、励起子ポラリトンの分散関係の決 定を試みた。青・紫色励起子の線幅は大きいため、広帯域で和周波の観測を行う必要がある。そこで広 帯域の赤外光を入射し、様々な周波数をもつ和周波を分光することで和周波スペクトルを取得するとい う、新規の分光法を開発した。その概念図を図 1(a)に示す。以下では測定した和周波のうち、入射光の 2 倍の周波数を持つものを 2-SFG、3 倍の周波数を持つものを 3-SFG と呼ぶことにする。

6K で測定した Cu₂O の青・紫色励起子の 3-SFG、2-SFG スペクトルを図 1(b)に示す。励起子のピーク エネルギーは、2-SFG スペクトルで 3-SFG よりも大きな値をとることが分かった。和周波のピークエネ ルギー値は、入射光と励起子ポラリトンの間にエネルギー保存則と波数保存則が満たされる点として決 定される。励起子ポラリトンの分散関係に励起子の減衰を考慮しないモデル[3]で計算される和周波の共 鳴エネルギー値を青破線で、減衰(Γ_B =16 meV, Γ_V =22 meV)を考慮したモデルでの値を赤破線で図 1(b) に示す。赤破線と実験結果が良く一致したことから、青・紫色励起子のように大きな減衰を持つ励起子 における和周波の共鳴エネルギーを説明するには、励起子ポラリトンの分散関係に励起子の減衰を考慮 する必要があることが初めて明らかとなった。



Fig. 1. (a) Concept of sum-frequency-generation (SFG) spectroscopy using a broadband light source. (b) 3-SFG and 2-SFG spectra of blue and violet excitons in Cu₂O at 6 K. Red and blue dashed lines show resonance energies calculated with and without considering the damping term.

- [1] T. Kazimierczuk, D. Fröhlich, S. Scheel, H. Stolz, and M. Bayer, Nature 514, 343 (2014).
- [2] S. O. Krüger and S. Scheel, Physical Review B 100, 085201 (2019).
- [3] W. Warkentin et al., Physical Review B, 98, 075204 (2018).

線ノード金属 CaSb2の超伝導発見

固体量子物性研究室 川口真世

Abstract We discovered that CaSb₂ exhibits superconductivity with the transition temperature of about 1.7 K. CaSb₂ is a candidate of the line-nodal material and possibility of topological superconductivity is theoretically proposed. We also succeeded in synthesizing single crystals of CaSb₂, crucially important for further investigation of its physical properties.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

近年、バルクの電子状態が非自明なトポロジーを持つトポ ロジカル物質が注目を浴びている。トポロジカル物質のひと つである線ノード金属は、バンド分散に線状のノードを持つ ギャップレスな物質である。伝導帯と価電子帯が k 空間で線 状に接していることが、両者が点で交わっているディラック 半金属・ワイル半金属と対照的である。

CaSb₂は、線ノード物質の候補として理論的に提案されて いる物質である[1]。特に興味深いのは、多くの候補とされる 物質ではスピン軌道相互作用を考慮すると線ノードの部分に ギャップが生じ、トポロジカル絶縁体やディラック・ワイル 半金属になってしまう一方で、CaSb₂は結晶の持つノンシン モルフィック(非共型)ならせん対称性によって保護されてお り、スピン軌道相互作用の下でも線ノードが安定に存在する と考えられている。

最近我々はこの CaSb₂が、およそ 1.7 K で超伝導を示すこ とを発見した[2](Fig. 2)。もし線ノード周辺の異なる軌道間 でクーパー対を作るならば、奇パリティのトポロジカル超伝 導が生じうると考えられている[2]。我々は CaSb₂の電気抵 抗率や磁化率、比熱などの物性測定を行い、CaSb₂の超伝導 特性を調べた。

さらに我々は CaSb₂ についてより理解を深めるために、 CaSb₂の単結晶育成を行った。アンチモンを用いたフラック ス法で単結晶育成を行い、フラックスとの完全な分離はまだ できていないものの、およそ数 mm 程度の単結晶を得ること に成功した。得られた単結晶試料について交流磁化率を測定 したところ、多結晶焼結試料でみられるような結晶粒界の寄 与は見られない、するどい超伝導転移を観測することができ た。

References

- [1] K. Funada, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 88, 044711 (2019).
- [2] A. Ikeda, <u>M. Kawaguchi *et al.*</u>, Phys. Rev. Materials 4, 041801(R) (2020).
- [3] K. Momma and F. Izumi, J. Appl. Crystallogr. 44, 1272 (2011).



Fig. 1. Unit cell of CaSb₂. The blue spheres represent Ca and the brown ones represent Sb. CaSb₂ belongs to the space group $P2_1/m$ with the screw axis along *b*. This figure is produced using the program VESTA [3].



Fig. 2. Temperature dependence of the resistivity of polycrystalline $CaSb_2$ measured under 0 mT, 10 mT, and 20 to 280 mT with an interval of 20 mT [2]. Under 0 mT, the resistivity starts to drop at 1.7 K and shows zero resistance at 1.2 K.

核磁気共鳴/核四重極共鳴測定を用いた CeRh₂As₂の超伝導と磁性の研究

固体量子物性研究室 木舩茉悠

Abstract We performed nuclear quadrupole resonance (NQR) and ac susceptibility measurements to investigate the superconducting properties of recently discovered CeRh₂As₂ which has a lack of inversion symmetry at the Ce site. The linewidth of the NQR spectrum is broadened below superconducting transition temperature T_{sc} , suggesting antiferromagnetic order inside the superconducting phase. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

f電子系重い電子状態は、局在f電子と伝導電子の反強磁性的交換相互作用によりf電子が遍歴性をもった状態であり、電子の有効質量 m*は自由電子と比べ 10²⁻³倍重くなる。この重い電子が超伝導を示す 重い電子系超伝導体では一般に有効質量が大きいため軌道対破壊効果が抑えられ、パウリ対破壊効果が 支配的となる。空間反転対称性が保たれた CeCu₂Si₂(Fig. 1 左)の上部臨界磁場は全磁場方向でパウリ対 破壊効果が支配的な振る舞いを示す。一方、CeRhSi₃(Fig. 1 右)などの結晶全体として空間反転対称性が 破れ Rashba 相互作用が強い系では、スピン方向に依存したフェルミ面の分裂が起こり、磁場方向によ ってスピン分布が大きく異なる。そのため磁場方向によってはパウリ対破壊効果が効かず、上部臨界磁 場は発散し、大きな磁気異方性を示す。

研究対象の CeRh₂As₂(Fig. 1 中央)は、有効質量 m^* と関係する電子比熱係数が約 1000 mJ/mol-K²と大き な値を持ち、 T_{sc} ~350 mK で超伝導転移をすることが 2018 年に報告された[1]。電子比熱係数が大きいこ とと T_{sc} で大きな比熱の飛びが見られることから CeRh₂As₂ は重い電子系超伝導体であると考えられる。 CeRh₂As₂ は空間群 P4/nmm に属し、Ce サイトが並びの違う Rh、As 層にはさまれた構造をしている。 そのため、Ce サイトでは局所的に空間対称性を持たないものの結晶構造としては空間反転対称性は保 たれている。このような結晶構造をもつ Ce 系重い電子系超伝導体の報告例はなく、特異な物性が現れ ることが期待される。

交流磁化率を用いて上部臨界磁場の測定を行ったところ、空間反転対称性が破れた系と同様な大きな 異方性を観測した。このことから、パウリ対破壊効果には局所的な空間反転対称性の破れが重要な役割 を果たすといえる。 **A = Si A = As A = Si**

さらに常伝導及び超伝導相の電子状態や磁性を 調べるために、ゼロ磁場下において⁷⁵As核の核四 重極共鳴(NQR)を行った。NQRスペクトルは、 超伝導転移温度より低い温度以下で線幅が増大す る。この増大は、反強磁性秩序が超伝導相内部に 存在していることを示唆している。反強磁性相内 部に超伝導相が存在している系は多く報告されて いるが、本物質のように超伝導相内部での反強磁 性転移は珍しく、非常に興味深い物質といえる。

References

[1] S. Kihm et al., ICM 2018 Y9-01.



Fig. 1. Ce 系超伝導体の結晶構造。左から 空間反転対称性が保たれた CeCu₂Si₂ 局所的に空間反転対称性が破れている CeRh₂As₂ 空間反転対称性空間反転対称性が破れた CeRhSi₃

ハロゲン化鉛ペロブスカイトナノ粒子における ホットエキシトンダイナミクス

ナノ構造光物性研究室 媚山悦企

Abstract We investigated hot exciton dynamics in lead halide perovskite nanocrystals. Effects of hot excitons on optical gain were clarified by single-pump and double-pump transient absorption spectroscopies. Exciton generation processes were controlled by the double-pump method, and we succeeded in suppressing hot-exciton-induced reabsorption. We also demonstrated improvement of optical gain properties.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

ハロゲン化鉛ペロブスカイトナノ粒子は、ハロゲン組成や粒子サイズ制御によるバンドギャップエ ネルギー可変性、高い発光量子効率といった特長を有する優れた光学材料である。そのため、発光ダイ オード、レーザー、量子光源、太陽電池といった光電デバイスへの応用研究が盛んに行われている。こ れまでに、ペロブスカイトナノ粒子の光学特性を決めるバンド端エキシトンの光励起・緩和ダイナミク スが詳しく研究されてきた[1]。一方で、バンド端エネルギーより大きなエネルギーを有するホットエ キシトンのダイナミクスについては不明な点が多い。特に、1光子から複数のエキシトンが生成される マルチエキシトン生成過程[2]や、強いエキシトン間相互作用に由来する光誘起再吸収[3]など、バンド 端エキシトンとは異なるホットエキシトン特有の光学応答の詳細はほとんど理解されていない。

そこで本研究では、ホットエキシトンによる強い光誘起再 吸収過程に着目し、ホットエキシトンが光学利得に与える影 響を調べた。実験ではフェムト秒過渡吸収分光法によりペロ ブスカイトナノ粒子の光学利得ダイナミクスを測定した。従 来のシングルポンプ法に加えてダブルポンプ法を用いるこ とでエキシトンとバイエキシトンの生成数を精密に操作し、 再吸収過程を決めるパラメータであるバンド端エネルギー シフトおよび光学利得閾値の測定を行った。その結果、1つ のナノ粒子中に生成されたエキシトンの数ならびに余剰エ ネルギーに依存してバンド端エネルギーシフト値が変化す ることを明らかにした。バンド端エネルギーシフト値の小さ な励起状態を効率的に生成することで再吸収を抑え、ペロブ スカイトナノ粒子の光学利得閾値の低減に成功した(Fig. 1)[4]。

さらに、ペロブスカイトナノ粒子の光電変換過程やキャリ ア輸送特性におけるホットキャリア特有のダイナミクスを 調べるため過渡光電流測定を行った。異なる励起エネルギー での測定結果から、バンド端エネルギーシフトに起因する光 電流生成メカニズムを明らかにした。

- [1] N. Yarita et al., J. Phys. Chem. Lett. 8, 1413-1418 (2017).
- [2] M. Li et al., Nat. Commun. 9, 4197 (2018).
- [3] G. Yumoto et al., J. Phys. Chem. Lett. 9, 2222-2228 (2018).
- [4] E. Kobiyama et al., Nano Lett. 20, 3905-3910 (2020).



Fig. 1. Pump interval time (Δt) dependence of optical gain thresholds ($\langle N_g \rangle$) under the double-pump method. Threshold values at $\Delta t = 10 \sim 30$ ps are smaller than the threshold under the single-pump method (the broken line: $\langle N_g \rangle = 7.3$). This result corresponds to the reduction in the optical gain threshold by the double-pump method.

ワイル近藤半金属における非線形応答に対する 強相関効果についての研究

凝縮系理論研究室 児藤鑑

Abstract Motivated by the recent observation of a giant spontaneous Hall effect in a Weyl-Kondo semimetal(WKSM) candidate, we numerically study the relation between strong correlation and nonlinear responses. We clarify the temperature dependence of nonlinear conductivities of WKSM, and find that strong correlation can enhance nonlinear responses. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

空間反転対称性の破れた系での非線形応答では、シフトカレントや非線形ホール効果などといった、 線形応答では現れ得ない様々な応答が現れることが知られている[1]。特に、非線形ホール効果につい ては、次の2つの点が興味深い。まず、線形応答では時間反転対称性の下でのホール効果は許されない が、非線形応答では時間反転対称性の下でも有限になり得る点、そして、そのホール伝導度が、ベリー 曲率双極子という、系のトポロジカルなバンド構造を反映した量と密接に結びついている点である[2]。 後者の特徴を利用すれば、分解能の問題でトポロジカルなバンド構造を直接に観測できていない、強相 関トポロジカル物質などを、輸送現象の面から調べられるという点で、非線形ホール効果は新たな実験 手段としても期待される。

そのような期待もあり、強相関トポロジカル物質の一つである、ワイル近藤半金属の候補物質 Ce₃Bi₄Pd₃において、非線形ホール効果の測定が行われた[3]。そして、驚くべきことに、通常のワイル 半金属に比べてホール角が10³ほど大きい、巨大な非線形ホール効果が観測された。この実験は、非線形 ホール効果が強相関効果によって増幅されていることを示唆しているが、一方で、理論的には、非線形 応答に関する研究の多くはフリーな系での解析に基づいてきたために、強相関効果と非線形応答の関係 は明らかになっていない。

そこで、我々は、ワイル近藤半金属に着目して、強相関効果と非線形応答の関係を調べた。具体的に は、Ce₃Bi₄Pd₃の対称性に基づいた周期アンダーソン模型を、動的平均場理論(DMFT)と数値くり込み群 (NRG)を用いて、強相関効果を取り入れて解析し、その非線形ホール伝導度と非線形縦伝導度を計算し た。その結果、強相関効果は非線形伝導度を増幅し得ること、そして、実験での巨大な非線形ホール効 果は、強相関効果によるものとして理解できることを示した。



Fig. 1. Temperature dependence of nonlinear Hall conductivity calculated for three cases. **DMFT**: The selfenergy calculated with DMFT is used. **Renormalization**: The renormalization effect and the chemical potential shift by the self-energy are considered. **Free**: Only the chemical potential shift is considered.

References

[1] Yoshinori Tokura and Naoto Nagaosa, Nat. Commun. 9, 3740 (2018).

- [2] Inti Sodemann and Liang Fu, Phys. Rev. Lett. 115, 216806 (2015).
- [3] S. Dzsaber et al., arXiv: 1811.02819 (2018).

2次 NI 相転移点近傍の流動場効果と臨界現象

ソフトマター物理学研究室 高橋希

Abstract We investigated the birefringence induced by periodically modulated flow in the isotropic phase near I-N phase transition of lyotropic liquid crystal. It is obvious a large critical phenomenon resulting from a near second-order I-N phase transition. Slow relaxation time (\sim 10s) suggest us the phenomenon should be related the sphere to rod shape transformation. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

一般的に界面活性剤を水に溶解すると、温度・濃度などに依存して界面活性剤分子は様々な形状の会 合体を形成する。特に、アニオン性界面活性剤 SDS とカチオン性界面活性剤 DTAB を混合した界面活 性剤水溶液は、棒状ミセル同士の配向方向が揃ったネマティック (N) 相を発現することが知られてい る。N 相は昇温により、棒状ミセル同士の配向方向が無秩序化すると同時に、会合体形状も棒から球へ と変化し、等方 (Iso) 相へ見かけの二次の相転移を起こす[1]。本研究では、N-Iso 相転移点近傍の Iso 相 で、周期的な流動による流動誘起複屈折の温度依存性を観測し、N-Iso 相転移における臨界現象を定量 的に議論した。また、振動流動場の周波数依存性から流動誘起複屈折のメカニズムの解明を目的とした。

試料は SDS と DTAB をモル混合比 α (=SDS/DTAB)として混合し たものに、精製水を加えて界面活性剤濃度 ϕ の水溶液とした。モ ル混合比 α は 1 に近いほどミセルの表面電荷は中性に近く、自発 曲率は低下してミセルは球状よりも棒状を好む。本実験では α を 2.6~2.8 程度として試料を作成した。偏光子・検光子はクロスニ コルで流動に対して 45°に配置した。試料に周期的な流動を与え、 流速の変化への透過光強度の応答を観測し、最大値 $I_{max}(T)$ 、最小 値 $I_{min}(T)$ 、振幅 $I_{amp}(T)$ の温度や混合比依存性を解析した。また、 流動周波数を変えて測定し、試料が流動に追従しなくなる緩和周 波数 fc を解析した。

流動に対する透過光強度 I の応答波形を Fig.1 に示す。流速が最大となる位相(0.5π と 1.5π)において透過光が極大していることより、流動方向に棒状ミセルが配向して複屈折が誘起されていると考えられる。また、 $I_{amp}(T)$ は、I-N 相転移点に向けて、温度の低下とともに(発散的に)に大きくなる臨界現象を示した (Fig.2)。I-N 転移点での $I_{amp}(T_{IN})$ は臨界異常性の大きさを示しており、aが大きな試料ほど、みかけの二次転移性が強いことが確認された。 $I_{amp}(T)$ 温度に対するべき指数は混合比によらず一定であることがわかり、aによらず I-N 転移点近傍での流動誘起複屈折は、同一のメカニズムで誘起されていると考えられる。

二次の相転移点近傍の臨界現象として、相転移点に向かって配 向秩序変数の揺らぎに臨界スローイングダウンが起こることが知 られている。本研究の測定から、流動に対する緩和周波数 fc も I-N 相転移点近傍において小さくなることが確認された(Fig.3)。し





Fig.2 temperature dependence of flow birefringence amplitude and inverse of it



Fig.3 temperature dependence of the relaxation frequency.

かしながら、Iso 相における流動誘起複屈折の応答時間(~10s)は、動的光散乱などにより、すでに観測さ れている Iso 相における配向秩序変数の揺らぎの緩和時間(~10ms)に比べて3桁近く遅い。すなわち、 流動誘起複屈折は、棒状ミセルが流動に対して回転して配向秩序を誘起するだけでなく、流動によりミ セル同士が会合・結合して会合数自体が変化し、長さが延伸している可能性を示唆している。会合数変 化には複数のミセルの合体が必要で、その空間拡散過程により変化が律速される。

References

[1] 山本、Jo、丸山、高西、Scalia、Lagerwall 2014 年液晶学会討論会予稿集

ネマティック超伝導の観測に向けた fiber Bragg grating による多軸ひずみ測定

固体量子物性研究室 谷口諒

Abstract The coupling between the nematic superconductivity and the strain is an interesting issue. We developed an apparatus for dilatometry at low temperatures using fiber Bragg grating, and measured multi-axis thermal expansion of $Sr_xBi_2Se_3$. Lattice deformation associated with the nematic superconductivity was not observed within our experimental resolution of 10^{-8} strain. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

トポロジカル絶縁体 Bi₂Se₃ に 電子をドープした *M_x*Bi₂Se₃ (*M* = Cu、Nb、Sr) はネマティック超伝導 体であることが明らかになった。すなわち、超伝導状態でNMRナイトシフト [1] や比熱 [2] などのバ ルク物理量の面内磁場角度依存性が結晶格子の持つ回転対称性を自発的に破る。最近、超伝導ネマティ ックドメイン構造を一軸圧の印加により制御できることがSr_xBi₂Se₃で報告された [3]。また、Nb_xBi₂Se₃ および Cu_xBi₂Se₃ のキャパシタンス法による熱膨張測定により、超伝導転移温度よりも高い温度で結晶 格子が自発的に変形することが報告された [4]。これらの結果はネマティック超伝導と格子ひずみとの 結合を示唆しており、両者の関係を明らかにするためにひずみ測定が重要である。特に、常伝導相での 自発的な結晶格子の変形の有無を検出するためには、多軸同時ひずみ測定によって対称性の変化を直接 捉えることが有効である。

ひずみ測定には従来キャパシタンス法または電気抵抗ひずみゲージ法が用いられてきた。キャパシタ ンス法は非常に高いひずみ分解能 (~10⁻¹⁰ - 10⁻¹¹) を持つが、ひずみの測定方向は通常単一方向に限られ る。ひずみゲージ法では多方向のひずみを同時に測定できるが、分解能は比較的低い (~10⁻⁶)。また、電 気抵抗素子を用いるため、低温では発熱が深刻な問題となる。最近、新しいひずみ測定手法として Fig. 1 に示すような光ファイバ上のセンサーであるfiber Bragg grating (FBG) [5] が利用されている。FBGを用 いることで、多方向のひずみを比較的高い分解能 (~10⁻⁷) で測定できる。また、金属部品を持たないた め電磁ノイズに強いことに加え、発熱が無視できるほど小さく低温測定に適している。これらの特長か ら、FBGはネマティック超伝導にともなう格子変形の検出に適した手法である。私は、ネマティック超 伝導の観測を目的として、FBGによるひずみ測定プローブを作製し、低

温多軸ひずみ測定環境を構築した。

FBGを用いたSrTiO₃の二軸同時ひずみ測定では、108 Kでの立方晶から 正方晶への構造相転移を明確に検出することができた。構造相転移の秩 序変数の臨界的振る舞いも10⁻⁷の分解能で検出でき、FBG による二軸同 時ひずみ測定が結晶構造の変化の検出に有効であることが確かめられた。

 $Sr_xBi_2Se_3$ の多軸熱膨張測定では、 $T_c = 2.78$ Kでのネマティック超伝導転移にともなう格子ひずみは検出されなかった。Cu あるいは Nb を添加したもので報告された格子ひずみ[4]が検出されなかった原因としては、ドメイン構造により異方性が打ち消された可能性、あるいは Sr添加系ではネマティシティと格子ひずみとの結合が小さい可能性が考えられる。

References

[1] K. Matano, M. Kriener et al., Nat. Phys. 12, 852 (2016).

- [2] S. Yonezawa, K. Tajiri et al., Nat. Phys. 13, 123 (2017).
- [3] I. Kostylev, S. Yonezawa et al., Nat. Commun. 11, 4152 (2020).
- [4] C.-w. Cho, J. Shen et al., Nat. Commun. 11, 3056 (2020).

[5] R. Daou, F. Weickert et al., Rev. Sci. Instrum. 81, 033909 (2010).



Fig. 1: Schematic of multi-directional strain measurement using the fiber Bragg grating (FBG).

単一ペロブスカイトナノ粒子の 低温発光スペクトルの研究

ナノ構造光物性研究室 張 健一

Abstract We studied low-temperature photoluminescence (PL) spectra of single perovskite. PL spectra were measured as a function of nanocrystal size and excitation laser fluence. The size dependence of trion and biexciton binding energies was clarified, and the LO photon energies of perovskite nanocrystals were determined from the LO-sideband PL spectra. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

ハロゲン化鉛ペロブスカイト(APbX₃, A = CH₃NH₃(MA), HC(NH₂)₂(FA), Cs, X = C1, Br, I)は、新し い光学材料として注目を集めている[1]。特にペロブスカイトナノ粒子は、高い発光量子効率や可視域 全般にわたるバンドギャップの可変性など優れた光学特性を示すため[2]、その特性を利用した研究が 進められている。最近の研究では励起子、荷電励起子および励起子分子の生成・緩和ダイナミクス、さ らには強い励起子格子相互作用がペロブスカイトナノ粒子の発光特性を支配していることが明らかに なりつつある[3,4]。しかし、ペロブスカイトナノ粒子における荷電励起子や励起子分子の束縛エネル ギーや励起子格子相互作用の大きさがサイズに対してどのように変化するかは明らかにされていない。 荷電励起子や励起子分子の束縛エネルギーおよび励起子格子相互作用の大きさの決定を行うためには、 室温における発光線幅の増大およびナノ粒子のサイズ不均

一性を排除した計測を行う必要がある。

本研究ではハロゲン化鉛ペロブスカイト FAPbBr3ナノ粒子 を試料として用い、低温(5.5K)において単一ナノ粒子顕微分 光を行った。低温での単一粒子の発光スペクトルは非常に線 幅が細いため、室温では観測されない多数のピーク構造が確 認された(Fig.1)。最も発光強度の強い励起子ピークの低 エネルギー側に4つのサイドピークが観測された。励起光強 度に対する各ピークの発光強度やナノ粒子サイズに対する 依存性を計測することにより、これらの起源が荷電励起子お よび励起子分子の発光と2つのL0フォノンレプリカである ことが分かった。荷電励起子と励起子分子の発光ピークでは 粒子サイズが小さくなるとクーロン相互作用によって束縛 エネルギーが増大することを明らかにした。さらに L0 フォ ノンによる発光ピークは、粒子サイズに依らず同じフォノン エネルギーを示すことが分かった。一方で、励起子ピークに 対する L0 フォノンレプリカの相対発光強度は、粒子サイズ が小さくなるにつれて増大することが確認された。これらの ナノ粒子サイズ依存性をもとに、粒子サイズが荷電励起子や 励起子分子の束縛エネルギーさらに励起子格子相互作用の 大きさに与える影響を解明した。

1.0 - FAPbBr₃ 0.5 - trion LO_2 LO_1 LO_1 LO_2 LO_1 LO_1 LO_2 2.21 2.22 2.23 2.24Photon Energy (eV)

Fig.1. Photoluminescence spectrum of a FAPbBr₃ nanocrystal at 5.5 K.

- [1] Y. Kanemitsu and T. Handa, Jpn. J. Appl. Phys. 57, 090101 (2018).
- [2] L. Protesescu et al., Nano Lett. 15, 3692-3696 (2015).
- [3] N. Yarita et al., J. Phys. Chem. Lett. 8, 6041-6047 (2017).
- [4] S. Masada et al., Nano Lett. 20, 4022-4028 (2020).

磁気共鳴による液体³He の流れ場検出法の開発

低温物理学研究室 長岡知己

Abstract In order to measure spatial distribution of flow in liquid ³He, we used DANTE pulse to draw lines in real space. Successive MRI measurement with different waiting time provided flow due to spin diffusion.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

超流動³He では、オーダーパラメータの空間変化を texture 構造と呼び、これらの texture 構造は系の 各種エネルギーやサンプルセルの壁などによって作られる境界条件の要請を満たすように決められる。 当研究室の笠井らは、平行平板中の超流動³He のA相において、巨視的に*î*がそろった領域の間に soliton と呼ばれる面欠陥(domain wall)を作り繋いでいることを、MRI ならびに MRSI 測定によって可視化し、 その構造特定に成功した[1]。また超流動転移温度近くではサンプルセルの壁におけるピン止めの効果が 弱くなり、この domain wall が動き始めることが発見されている。この動きに超流動 ³He の流れが関与 している可能性があり、局所的な流れ場を検出する方法の開発が待ち望まれている。そこで今回我々は、 直径 1mm 円筒容器内部における超流動 ³He-A や ³He-B での texture 構造の特定ならびに流れ場を検出 するための新たなサンプルセルを設計製作した。

通常の MRI 測定では、平衡状態の磁化分布を取得するが、測定前に非平衡状態を作成しておくことで、非平衡状態の磁化分布を取得することもできる。サンプルセル内の液体 ³He を空間選択的に励起するダンテパルス法を用い励起した後、MRI 測定を待ち時間を変えながら行うことは、液体 ³He に局所的な印をつけた後の時間発展を測定することに対応し、そこから流れ場を検出することができる。直径 1mm の円柱状試料断面に、50µmの幅の筋状の非平衡状態を作り出し、周囲部分との間の磁化の流れによって、時間変化する様子を MRI 測定により可視化した(Fig1)。筋を付けてからの待ち時間を変えたときの平衡状態に向かって回復していく様子を Fig2 に示す。この時間変化はスピン拡散による磁化の移

動によるものである。空 間パターンの時間変化に より検出できる速度は現 状では 100 µm/s 程度で ある。これは超流動³He 中 の量子渦の作る速度場を 渦心から 100 µm離れた位 置で検出できる分解能に 相当する。



Fig 1 MRI picture after DANTE pulse



References

[1] J. Kasai et al., Phys. Rev. Lett. 120, 205301 (2018).

半導体ナノ粒子からの高次高調波発生の研究

ナノ構造光物性研究室 中川耕太郎

Abstract We studied the mechanism of higher harmonics generation from semiconductor perovskite nanocrystal (NC) films under strong mid-infrared laser illumination. The polarization dependence of harmonic intensity could be explained by the selection rules arising from the rotational symmetry of the NC crystal structure.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

近年、高強度な超短パルスレーザー技術の進展により、強電場下における新たな非線形光学現象が観 測できるようになり、基礎および応用の両面から研究が活発に行われている。その一つが、励起光の整 数倍のフォトンエネルギーの光が発生する高次高調波発生(HHG)である。固体からの高次高調波発生 は新しい波長変換手法となり、アト秒パルス光源やX線までの高エネルギーの光源としての応用が期待 されている[1]。しかし、固体の高次高調波の発生機構の詳細は不明で、強い光電場で励起されたキャ リア(電子・正孔)がバンド内を加速運動するときに発生するバンド内電流およびバンド間に生じる非 線形分極による光放出が提案されており、その理解に向けて実験および理論の両面から活発が行われて いる[2-4]。そこで本研究では、HHGメカニズムの理解を目的に、バンド構造や電子の波動関数の空間的 広がりを制御できるナノ粒子を試料として、さらに円偏光レーザーを励起光として用いることにより、 発生する高次高調波の特性評価を行った。

ハロゲン化鉛ペロブスカイト (CsPbBr₃) ナノ粒 子を 3.5 µm の中赤外光で励起することにより、 13 次までの奇数次の高次高調波を観測した (Fig. 1)。偶数次が観測されないのは、ペロブスカイ トの結晶構造に反転対称性があることに起因す る。また、円偏光励起下で発生する高調波の右回 り偏光成分と左回り偏光成分をそれぞれ測定し、 立方晶ペロブスカイト (4 回回転対称)の偏光選 択則を反映していることを明らかにした[5]。ま た、MAPbCl₃ 単結晶から発生した高調波よりも強 度が高いことがわかった。数 100 nm の厚みのナ ノ粒子薄膜試料では、発生した高調波の再吸収が 抑制され、高効率な高調波発生が可能であること を示した。

さらに、高調波強度の励起光楕円率依存性を測 定した。励起光が円偏光に近づくに従い、ナノ粒 子からの高調波強度が減少し、円偏光励起ではほ ぼゼロになる様子が観測された[5]。これは、異 なる配向のナノ粒子から発生する高次高調波が 干渉することに起因するものと考えられる。

- [1] S. Ghimire et al., Nature Physics 7, 138 (2011).
- [2] N. Yoshikawa *et al.*, Science **356**, 736 (2017).
- [3] Y. Sanari et al., Nature Commun. 11, 3069 (2020).
- [4] Y. Sanari et al., Phys. Rev. B 102, 041125(R) (2020).
- [5] K. Nakagawa et al., Phys. Rev. Mater. (2021) in press.



Fig. 1. HH spectra emitted from the CsPbBr₃ NC film under $3.5 \ \mu$ m laser illumination.

自己推進する物体間に働く流体相互作用: 埋め込み境界法を用いた数値解析

流体物理学研究室 中田 拓海

Abstract We numerically investigate the propulsion efficiency in multiple swimming methods and shapes in two dimensions. We find that changing the angle of attack appropriately is more efficient than keeping constant. Regarding the shape, an elliptical shape is more efficient than an airfoil in the Reynolds number of this study. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

生物は進化の過程で多様な形状を獲得し、自然選択される。しかし、なぜある形状が自然選択されるのかは難 しい問題である。本研究では、この問題を流体物理学の視点からアプローチする。

最近の研究では、翼形状の集団運動の研究 [1] や、魚類の複数の形状及び遊泳を比較した研究 [2] がある。また、生物の問題だけではなく、工学の分野では制約条件下で欲しい性能を最大化する構造を求める研究もなされており、各分野で興味が持たれる問題である。

本研究では、10²~10³ 程度のレイノルズ数の二次元流体中を自己推進する物体が流体から受ける力を考察し、 流体中での物体形状および遊泳方法の最適化問題を考える。現実との対応では、大きさ数 cm ほどの物体が常温 の水中を数 cm/s で遊泳する場合である。

数値計算には埋め込み境界法 [3] を用いた。埋め込み境界法は、複雑な形状の境界を含む流体の数値解析で使われる。特に今回はそのうちのペナルティ法を用いた。





Fig.2 Vorticity field of a moving ellipse of the pattern (d).

Fig.3 Drag coefficients C_D versus time for the pattern (c).

Fig.1 4 patterns of swimming modes.

計算結果は複数の遊泳方法及び形状における抗力係数の時間平均 $\overline{C_D}$ で比較した。遊泳方法は、Fig.1 に示す4パターンである。遊泳方法(d)だけ物体の長軸とx軸とのなす角(迎角)を変化させる。形状については、円、楕円、翼形の3パターンである。

遊泳方法 (a)(b) では、翼形の場合に最も $\overline{C_D}$ が小さくなる。遊泳方法 (c) と (d) を比較すると、円の場合は大きくは変わらないが、楕円と翼形ともに (d) の場合に $\overline{C_D}$ が約 70% 小さくなる。

この結果から、迎角を 0° に保つ場合 ((c) の方法) よりも適切に変化させる場合 ((d) の方法) がより効率的で あることがわかる。また、形状については、本研究のレイノルズ数領域では、流線形状 (翼形) と楕円形状が効 率的で、両者の間には大きな違いは見られない。本論文中でこの物理的原因を考察する。

- [1] A. D. Becker et al., Nature communications 6, 1-8 (2015)
- [2] M. Bergmann et al., Journal of Computational Physics 230, 329-348 (2011)
- [3] F. Sotiropoulos et al., Progress in Aerospace Science 65, 1-21 (2014)

非エルミートワイル半金属におけるカイラル磁気表皮効果

物性基礎論:凝縮系物理 中村大地

Abstract In non-Hermitian physics, almost all energy eigenstates sometimes are localized at edges under the open boundary condition. Previous research in [2] has predicted that this phenomenon can occur by applying a magnetic field to a non-Hermitian Weyl semimetal. We numerically confirm the prediction and establish this new non-Hermitian effect - the chiral magnetic skin effect. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

散逸や増幅によりハミルトニアンがエルミート性を失った系を非エルミート系と言い、強相関電子系 や冷却原子系、フォトニック結晶系がその例に当たる。近年ではそのような非エルミート系に関するト ポロジカル相の研究が盛んに行われており、物理と数学の両面から様々なアプローチがなされている。 中でも、系に端を作った時にエネルギー固有状態のほとんど全てが端に局在する表皮効果[1]は、エル ミート系には無い物理現象として大きな注目を集めている。

別所・佐藤は、論文[2]において、非自明な三次元巻きつき数を持つ三次元非エルミート系が三次元ワ イルフェルミオンを有することを示した。さらに、磁場を印加することでワイルフェルミオンがカイラ ル磁気効果(CME)[3]を示し、それによって新しい種類の表皮効果-カイラル磁気表皮効果(CMSE)が誘起 されると予想した。ここで、CMEとはワイル半金属の示す電磁応答の一つで、磁場の印加方向にカイラル モードによる電流が生じる現象のことである。CMEは定常状態では実現できないことが知られているが、 非エルミート系においてはその不安定性のため非平衡状態となり、CMEが生じると予想したのである[2]。

我々は三次元非エルミートワイル半金属の模型(1)に対し磁場を印加することで、実際にカイラルモ ードが生じることを示し(Fig.1)、さらに波束のダイナミクスを調べることでCMEが生じることを確認し た。またその帰結として論文[2]の予言通り、表皮効果が誘起されたと解釈できる結果を得た(Fig. 2)。





 $H(k_x, k_y, k_z) \coloneqq \sum_{i=x, y, z} \sin k_i \sigma_i - \frac{i}{2} \left(3 - \sum_{i=x, y, z} \cos k_i \right) \sigma_0$



(1)

Fig.1. The energy spectrum of Hamiltonian (1) under a magnetic field along the z direction under the periodic boundary condition. The red dots represent chiral modes.

Fig.2. The energy spectrum of Hamiltonian (1) under a magnetic field along the z direction under the open boundary condition. The orange dots indicate the CMSE.

- [1] S. Yao and Z. Wang, Phys. Rev. Lett. 121, 086803 (2018).
- [2] T. Bessho and M. Sato, arXiv:2006.04204.
- [3] K. Fukushima et al., Phys. Rev. D 78, 074033 (2008).

強誘電ネマチック相を示す棒状液晶分子モデルの 分子動力学シミュレーション

相転移動力学研究室 服部爽音

Abstract We numerically study ferroelectric nematic liquid crystal phase by considering rod-like molecules with a bulky central part. This bulky central part is likely to weaken the side-by-side attractive interaction among the molecules. Although spontaneous orderings have not been observed, our molecular systems possibly show ferroelectric nematic order. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

強誘電性を持つネマチック液晶を考える。液晶分子のモデルとして棒状分子を考えた際、主軸方向 に分極したネマチック相は理論的には否定されていないが、数値シミュレーションによる先行研究に よると、そのような相は見つかっておらず、その存在は否定的に考えられている。例えば Gay-Berne ポ テンシャルと主軸方向に沿った双極子だけでは強誘電相は生じないことが報告されている[1-3]。一方 で最近、棒状分子で主軸方向に沿った強誘電ネマチック相らしきものが実験的に報告された[4]。本研 究では、分子の形状を見直すことで、強誘電性ネマチック相を発現しうる分子モデルを考案し、その 物的機構について調べた。

棒状分子で強誘電秩序が発現しにくいのは、円盤状分子などと異なり、棒状分子は横方向の相互作 用の方が強く、分子が横方向に接触した際に双極子が反対を向こうとするため、全体の分極が抑制さ れるためと考えられる。そこで、棒状分子ではあるが横に配置しにくいモデルとして、Fig.1に示すよ うに中心部が嵩張った形状の分子を考えた。1~3,6~8番目の粒子の半径を1、4~5番目の粒子の半径 をrとしている。8つの球状粒子を並べたもので構成されるが、4番目と5番目の粒子の半径が他より 大きいものとしている。また、1~3番目の分子に正の、6~8番目の分子には負の電荷を与え、主軸方 向の双極子ができる。

分子動力学シミュレーションを用いて、この分子モデル 1000 個からなる NVT アンサンブルで、外場を一定時間加えた後印加を解いて平衡状態を用意し、ネマチック秩序変数 $P_2 = (3/2) \langle \cos^2 \theta - 1/3 \rangle k$ 極性(強誘電)秩序変数 $P_1 = \langle \cos \theta \rangle$ の最終値を計算した。結果は Fig.2 のようになり、r=1.5のモデルではある密度以上で強誘電秩序が発生することが確認された。



Fig.1 The conventional model of liquid crystal molecules with r=1 (top) and our model with a bulky central part r=1.5 (bottom). r is the ratio of the radii of the central bulky particles and radii of the other particles.



Fig.2 Plots of the nematic order (red points) and polar order in the system with r = 1.5 after removing the applied external field against the volume fraction.

- [1] K. Satoh, S. Mita, and S. Kondo, Chem. Phys. Lett. 255, 99 (1996).
- [2] R. Berardi, S. Orlandi, and C. Zannoni, Chem. Phys. Lett. 261, 357 (1996).
- [3] M. Houssa, A. Oualid, and L. F. Rull, Mol. Phys. 94, 439 (1998).
- [4] H. Nishikawa, et al., Adv. Mater. 29, 1702354 (2017).

精微な計算量理論に基づく量子超越性

物性基礎論:量子情報研究室 早川龍

Abstract In order to show the advantage of quantum computing over classical computing, the sampling problem has been gathering much attention recently. We show that there exist quantum algorithms which cannot be classically sampled even in exponential times based on some conjectures on problems of graphs and geometry.)

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

判定問題の意味で、量子計算で効率的に解ける問題のクラス(BQP)が古典計算で効率的に解ける問題 のクラス(BPP)と真に異なるかは未解決問題であるが、量子計算が古典計算よりも高速であることを示 すために理論・実験の双方において様々な研究がなされている。近年、サンプリング問題という問題に おいて量子計算の優位性を示す研究が盛んになされている。サンプリング問題とは、量子計算の出力の 確率分布を許される誤差の範囲内でサンプリングせよという問題である。サンプリング問題に関する量 子高速性は、しばしば「量子超越性(Quantum Supremacy)」と呼ばれる。サンプリング問題を考えて量 子優位性を示すことには(i)古典計算量理論で非常に確からしいと信じられている仮定に基づいて量 子優位性を示すことができる(ii)現在実現されているような量子ビットが少なく、ノイズのある量子 コンピューターでも(ショアーの素因数分解のアルゴリズム[1]などと比べると)量子優位性をデモンス トレートしやすい(iii)ユニバーサルではない量子計算のモデルについても量子優位性を示すことが できる、というメリットがある。実際に、2019年には、53量子ビットのプログラム可能な量子コンピ ューターを用いて、量子優位性実現することを試みた実験がなされた[2]。

従来の結果では、古典計算量理論における「多項式階層が崩壊しない」という仮定に基づき、量子計 算の出力の確率分布が多項式時間でサンプリングできない、ということが文献[3][4]などにおいて知ら れていた。しかし、そのような結果からは、量子計算が超多項式時間や指数時間でシミュレートできる かもしれないという可能性を否定することができていなかった。我々の研究では、Orthogonal Vectors (OV)、3-SUM、All-Pairs Shortest Paths(APSP)という、グラフや幾何学的な問題に関しての古典計算量理 論における精微な計算困難性の仮定(Fine-grained Complexity) [5]に基づき、量子計算が指数時間かけて も古典シミュレートできないという結果(Fine-grained Quantum Supremacy)を示した(表1)。量子計算が 指数時間かけても古典シミュレートできないことを示すための先行研究[6][7]においては、強指数時間 仮説(SETH)や、SETH に類似の仮定が用いられたが、我々が用いた仮定は、SETH よりも安定、あるい は SETH とは独立な仮定であるので、仮に SETH が破れても有効なものとして生き残るものである。

Table 1. Our lower bounds of classical sampling based on each conjecture. N is the number of qubits of quantum computation.

下限	仮定
$2^{\frac{2-\delta}{6(c+1)}N} \ (\forall \delta > 0, \ \exists c > 0)$	OV
$2^{\frac{2-\delta}{2(13+3\eta)}N} \ (\forall \delta, \eta > 0)$	3-SUM
$2^{\frac{3-\delta}{8}N} \ (\forall \delta > 0)$	APSP

- [1] P. Shor, SIAM review **41** (1999): 303-332.
- [2] F. Arute, et al., Nature 574, 505–510 (2019).
- [3] S. Aaronson, and A. Arkhipov, STOC'11, Pages 333–342 (2011).
- [4] A. Bouland, et al., Nature Physics **15** (2019): 159-163.
- [5] V. Vassilevska Williams, IPEC 2015.
- [6] A. M. Dalzell, A. W. Harrow, D. E. Koh, and R. L. L. Placa, Quantum 4, 264 (2020).
- [7] T. Morimae, S. Tamaki, Quantum Inf. Comput. 19, 1089 (2019).

2 軌道光格子中の超低温原子: 量子スピン輸送の観測と超精密同位体シフトの測定

量子光学研究室 肥後本 隼也

Abstract By using the Yb ${}^{1}S_{0}$ and ${}^{3}P_{0}$ two-orbital system, we realize the spin transport induced by localized impurities in the quasi (0+1)D system. In addition, we measure the isotope shifts with an error of 30 Hz for every bosonic pair of Yb for the physics beyond the standard model. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

近年、次元や格子の構造などを高度に制御できるため、光格子中での冷却原子を用いた量子シミュレーションの研究が盛んに行われている。当研究室では、主にイッテルビウム(Yb)原子を対象とした研究を行っている。Yb原子の特徴として、2電子原子であるために、基底状態¹S₀と準安定状態³P₀が存在し、それらを異なる軌道の電子とみなした2軌道系が存在すること、安定同位体(Boson: 5種, Fermion: 2種)が数多く存在することが挙げられる。そこで、本研究では、Ybの¹S₀-³P₀の2軌道系を用いて、量子スピン輸送の観測と超精密同位体シフトの測定という2種類の研究を行った。

輸送現象は、物理学において幅広い分野において重要な役割を果たしている。量子気体原子系は孤立 系であるために外界とのやりとりがなく、これまで輸送現象を観測する研究があまり盛んではなかった。 しかし近年では、量子気体を用いて輸送現象を観測するということが可能になっている。例えば、高度 に設計された光学ポテンシャルを駆使して、メゾスコピックな量子ポイントコンタクト構造を実空間に 作成することで、2つの端子間のコンダクタンスの量子化が実証された[1]。さらに、最近、極低温原子 のスピン自由度を利用した量子輸送実験の新しい方法が提案されている[2,3,4]。これらの提案は、スピ ン空間において量子輸送を行うため、[1]のような精巧なポテンシャルを用意する必要がなく、精密な量 子輸送の観測の実験を行うことが期待できる。このような背景のもと、本研究では、本研究室で構築に 成功している、¹So 遍歴-³Po 局在の(0+1)混合次元系において、不純物に誘起された量子スピン輸送現象が 起こっていることを実験的に示した。さらに実験のパラメータを制御することで様々にスピン輸送ダイ ナミクスを操作することに成功した。この結果によりスピンを駆使した新しいアトムトロニクスの道が 開かれたと言える。

一方、近年の冷却原子を用いた精密分光実験の発展は著しく、標準模型を超える物理を調べる有用な プラットフォームとなっている。最近、Kingプロットの非線形性を検証することで新粒子を探索できる 可能性が提案された。Kingプロットとは、複数の同位体対に対し、2つの光学遷移の同位体シフトを2次 元平面にプロットすると、標準模型の範囲内では高い精度で線形に並ぶことである。ただし、標準模型 の範囲内でも高次の効果を考慮するとKingプロットの線形性が破れることが知られている。そこでより 多くの遷移を用いて次元を拡張したKingプロットを考えることで高次の効果を消去することができ、新 粒子による非線形性のみを精査できるようになることが提案されている。そこで本研究では、新粒子探 索の足掛かりとして、狭線幅励起レーザー光を用いて¹So-³Po遷移の共鳴をすべてのBoson同位体について 線幅数10 Hzで見つけることに成功した。また、同位体シフトの系統誤差を評価するために、各同位体の 魔法波長や2次のZeemanシフトを測定し、すべてのBoson同位体ペアに対して同位体シフトを30 Hzの精 度で測定を行った。先行研究におけるYbイオンでの同位体シフトの結果[5]と組み合わせることで3次元 のKingプロットを作成し、3つのペアは平面上に乗り、1つのペアはKingプロットの平面から34oの非線 形性を示すことを確認することができた。

- [1] S. Krinner et al., Nature 517, 64-67 (2015).
- [2] M. Knap et al., Phys. Rev. X 2, 041020 (2012).
- [3] J.-S. You et al., Phys. Rev. B 99, 214505 (2019).
- [4] S. Nakada et al., Phys. Rev. A 102, 031302 (2020).
- [5] I. Counts et al., Phys. Rev. Lett. 125, 123002 (2020).

視野角制限 Vicsek モデルの構造形成

流体物理学研究室 平野稜

Abstract By restricting the "view angle" in the Vicsek model, the density concentrates in a banded structure. We approach this so-called banded-liquid phase with continuum versions of the Vicsek model. We find numerically a similar phase, which is a transient state in a finite domain. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

鳥の群れや細菌コロニーなどの集団運動を記述するモデルとして、Vicsek モデルが知られている [1]。これは 一定の速さを持つ自己駆動粒子の集まりにおいて、ある時間間隔ごとに各粒子が近傍にある粒子の平均速度に 向きを合わせるという単純な局所的相互作用モデルである。このモデルは粒子の速さや密度、ノイズなどのパ ラメータを変化させることによって多様な構造を示す。本研究で注目する構造は、粒子が相互作用する角度範 囲(視野角)を制限することによって現れる特徴的なバンド的液体相である [2]。バンド的液体相とは、紐状に 連なった粒子群の中に局所的な密度の集中が見られる構造である。我々はこれを先行研究 [2] と異なる離散モデ ル [3] で再現し、この構造の普遍性を確かめた(Fig.1)。さらに同様の構造が連続体モデルにおいても現れるか どうかを確かめるため、以下の流体力学方程式を用いた数値シミュレーションを二次元周期境界条件で行った

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot \mathbf{w} = D \Delta \rho, \tag{1}$$

$$\partial_t \mathbf{w} + \frac{1}{2} \nabla \rho = [\mu(\rho) - \xi |\mathbf{w}|^2] \mathbf{w} + D_i \Delta \mathbf{w} + D_a \nabla (\nabla \cdot \mathbf{w}) - \lambda_1 (\mathbf{w} \cdot \nabla) \mathbf{w} - \lambda_2 (\nabla \cdot \mathbf{w}) \mathbf{w} - \lambda_3 \nabla |\mathbf{w}|^2.$$
(2)

ここで、 ρ は密度場、**w** は速度場、 $D, D_i, D_a, \mu, \xi, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ はパラメータである。また $\mu(\rho)$ は密度の線型関数 である。

まず、視野角制限に対応するパラメータ([2] で提案されている)を設定して計算した。Vicsek モデル一般 に、計算領域サイズ依存性が知られている。実際に式(1),(2)の結果も、小さな計算領域ではバンド的液体相と 類似のものが得られたが、いずれ定常になってしまう。計算領域を大きくすると望ましい状態に向かうと思われ るが、数値的に不安定となりシミュレーションが不可能となった。そこで、我々はより単純な連続体モデル[4] のシミュレーションを行なうことにした。この単純モデルには Solitary wave(定常進行波解)と Stationary aster (定常解)という二つの解がパラメータに応じて存在することが知られている。我々はこの二つの解の中間 状態にバンド的液体相があると予想して計算を行った。計算領域サイズを変えて計算すると、最終的には二つの 解のいずれかに帰着するものの、過程ではバンド的液体相と定性的に類似の構造が見られた(Fig.2)。さらに、 定常状態に至るまでの収束時間は、領域サイズに対して指数関数的に増加することがわかった。この結果は、単 純モデルにおいて十分広い領域では、バンド的液体相が統計的準定常状態として得られることを示唆している。



Fig.1 Density contour map (discrete Vicsek model).



Fig.2 Density contour map (continuum Vicsek model).

References

1

- [1] T. Vicsek and A. Zafeiris, Phys. Rep. 517, 71-140(2012).
- [2] Q. Chen et al., Phys. Rev.E 96, 020601(R)(2017).
- [3] M. Durve and A. Sayeed, Phys. Rev. E 93, 052115(2016).
- [4] A. Gopinath et al., Phys. Rev.E 85, 061903(2012).

液晶系の相分離における配向と欠陥の操作

時空間秩序·生命物理学研究室 增田聖弘

Abstract When a nematic liquid crystal is restrained in a droplet, various structures appear since its increased frustration beside defect arrangements. We observed behaviors of droplets in two phase system of liquid crystals. Liquid crystal inner droplets were affected by the outer liquid crystal. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

ドレッシングやマヨネーズは液体の水と油が相分離している分散溶液である。片方の媒質が固体の場 合は、結晶成長や析出などの減少に相当するだろう。では、液晶の場合はどうなるだろうか。特にドロ ップレットとして分散されている状況を見てみる。液晶(nematic)中に液体(isotropic)ドロップレ ットが分散されているとき、弾性相互作用によってドロップレットは液晶の欠陥を介して集合したり、 規則的に並んだりする。ドロップレットが固体粒子同様の構造を安定的に見せることから、これらはネ マチックコロイドとも呼ばれて研究が進められてきた[1]。逆に、液晶がドロップレットの場合はどう なるだろうか。ネマチック相という1軸の異方性を持つ弾性媒質を球に閉じ込めると、大きなフラスト レーションが発生するので欠陥構造をはじめとしたさまざまな構造が発現する。ドロップレットのサイ ズやアンカリング力の大小によって安定構造は異なる。また液晶相自体も複数存在することから、さま ざまなマイクロ構造を作る手段や[2]、自発運動の多様性など[3]から、近年注目されている。今回、我々 は素朴に両方の相が液晶の場合に興味を持った。先に挙げた分散液晶ドロップレットの場合、単純に考 えるとドロップレット内部の構造は与えた境界条件によってほぼ1つに決まる。一方で外側も液晶相の 場合、アンカリング力の空間非対称性などを通じて、内部の構造を操作できる可能性がある。

実験では、水系の液晶と水と相溶性の低い一般の液晶の2つを用いた。対称性の異なる液晶相同士の 相分離構造は相転移の途中などで観察されるが、一般にそれらは不安定なため定常的なものとして得る ことは難しい。そこで、単純なネマチック相同士の相互作用を実験で得るために、水に分散した棒状結 晶が液晶となる分散水溶液と疎水的な液晶の組み合わせの実験系を施行した。得られたドロップレット 分散水溶液の濃度や温度を変えることで相状態を変化させて実験を行った。



Fig. 1. Polarization images of droplets in the phase separated system of two liquid crystals. Observation were taken under crossed nicols. Scale bars, 100µm.

- [1] I.Muševič, M.Škarabot, U.Tkalec, M.Ravnic, and S.Žumer: Science 313 (2006) 954.
- [2] Martin Urbanski et al., J. Phys.: Condens. Matter 29 133003 (2017).
- [3] M. Suga, S. Suda, M. Ichikawa, and Y. Kimura, Phys. Rev. E 97, 062703 (2018).

強磁性超伝導体 UCoGe における特異な磁気転移及び b 軸磁場によって増強される強磁性ゆらぎと超伝導の研究

固体量子物性研究室 松崹 聡

Abstract A ⁵⁹Co-NMR measurement was performed on a single-crystalline ferromagnetic superconductor UCoGe under high fields along the a and b-axes. We found that the enhancement of superconductivity in $H \parallel b$ is induced by critical ferromagnetic fluctuations along the *c*-axis. Moreover, first-order like ferromagnetic transition was observed in $H \parallel b$. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

UCoGe は強磁性と超伝導の起源が同一電子であると考えられる数少ない物質(ウラン強磁性超伝導 体)の一つであり、その電子はU5fの遍歴電子である。UCoGeは c軸方向に強いイジング異方性を持 ち、c 軸方向の磁場で超伝導が急激に抑制される。そのため、この物質の超伝導発現機構に c 軸方向の イジング的な強磁性磁気ゆらぎが深く関わっていると考えられている[1]。一方、この磁気ゆらぎを抑制 しない a, b 軸方向の磁場に対しては、パウリ極限を大きく超える上部臨界磁場 Hc2を持つ。特にb 軸方 向に正確に磁場をかけると超伝導が増強される特異なH_{c2}の振る舞い(リエントラント超伝導)を示す[2]。 それに対しa軸方向の磁場下では、そのような超伝導増強は見られずに転移温度は単調減少する(図)。

さらに、UCoGe は磁気相図においても興味深い特徴を持つ。一般に、ゼロ磁場・常圧下での強磁性 転移は2 次相転移として知られているが、UCoGeの場合は同条件の下で1次相転移を示す[3]。同じウ ラン強磁性超伝導体である UGe2[4]や URhGe[5]において実現している三重臨界点(TQP)や、転移が特定 方向の磁場で分裂する wing 構造[6]に1次相転移的な強磁性転移が現れるため、UCoGe においても wing 構造が実現しているかどうかに興味が持たれている。

我々は UCoGe の b 軸に磁場をかけた場合における特異な超伝導の性質を理解するために、高磁場領 域を中心に⁵⁹Co-NMR 測定を行った。測定は、磁場方向の相違によってリエントラント超伝導が発現・ 消滅する起源を探るため、b軸磁場下とa軸磁場下の両方で行っている。UCoGeではわずかなc軸成分 の磁場により物性が大きく影響を受けるため、我々は約 0.05 °の精度で角度制御を行った。磁場と垂 直方向の磁気ゆらぎと関係した核スピン-格子緩和率 1/T₁に加え、磁場方向の磁気ゆらぎと関係する核 スピン-スピン緩和率 1/T₂の測定により磁気ゆらぎの異方性を調べることが可能である。 約 1.5 K での測 定から、1/T1,1/T2は超伝導増強が見られるb軸方向の磁場で強く発達するのに対し、a軸磁場では殆ど 磁場依存性がないという結果が得られた。磁気ゆらぎについて詳しく解析したところ、b軸方向の磁場 下でも強磁性磁気ゆらぎはc軸方向が主要であり、このc軸方向の磁気ゆらぎが超伝導増強の起源であ ることが示唆される。これは強磁性超伝導体 URhGe の超伝導増強と同様であるが[7]、主要となるゆら ぎの方向の違いが存在する。

E

また、UCoGeの磁気相図の詳細を探るために⁵⁹Co-NMR のスペクトルの温度依存性・磁場依存性も測定した。その 結果、ゼロ磁場下で見られていた1次相転移的な強磁性転 移がb軸磁場下でも継続して観測され、また c軸方向に磁 場を数度傾けていても同様であることを発見した。この磁 気相図は、TQP が負の磁場領域にあるような wing 構造の 実現を否定しない結果となっている。

- [1] T. Hattori et al., Phys. Rev. Lett. 108, 066403 (2012).
- [2] D. Aoki, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 78, 113709 (2009).
- [3] T. Ohta, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 79, 023707 (2010)
- [4] H. Kotegawa et al., J. Phys. Soc. Jpn. 80, 083703 (2011).
- [5] F. Lévy, et al., Nature Physics 3, 460 (2007). [6] D. Belitz, et al., Phys. Rev. Lett. 94, 247205 (2005).
- [7] Y. Tokunaga et al., Phys. Rev. Lett. 114, 216401 (2015).



Creation of large mass imbalanced ultracold atomic mixtures of alkali and rare-earth metals with tunable interactions

Quantum Optics Group

Naoto Mizukami

Abstract We have realized a mixture with up to three different atomic species, Erbium, Ytterbium and Lithium. While Lithium is very light, the other species are heavy and large mass imbalanced systems can be realized. Indications of tunable interactions between the heavy Erbium and the light Lithium atoms are found.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

Ultracold atoms in an optical lattice are an ideal platform for quantum simulations. Quantum simulation is a method to simulate quantum phenomena in a highly controllable quantum system. Atoms in an optical lattice, imitate the situation of electron in a crystal and one can reproduce a real substance with a high controllability. Typically up to 10^5 , atoms can be tuned in terms of inter-atomic interaction, density and dimensionality. However, this system is sometimes "too perfect" with no defects and impurities which real substances are likely to have. What is notable here is that impurities sometimes induce important phenomena such as the Kondo effect [1], Anderson localization [2], and Anderson's orthogonal catastrophe [3]. In our research, we have realized a mixture of atoms with a large mass imbalance aiming to address these impurity problems. When both heavy and light atoms are introduced into an optical lattice, heavy atoms tend to localize in the sites of the lattice. On the other hand, light atoms move freely through the optical lattice. Interpreting localized heavy atoms as impurities, we expect to simulate impurity problems. Furthermore, such a mixture is expected to be highly useful for other researches, too. In many-body physics it is a promising candidate for realizing p-wave superfluidity in two



Fig. 1. Three atomic species trapped simultaneously. (a) Er. N $\approx 5 \times 10^5$. (b) Yb. N $\approx 5 \times 10^5$. (c) Li. N $\approx 1 \times 10^5$.

dimensions [4]. In few-body physics we may be able to investigate Efimov states involving two Fermions [5]. As a light atomic species, we are using Lithium (Li) atoms. As a heavy atom, we have cooled Ytterbium

(Yb) and Erbium (Er) atoms (see Fig. 1). With Yb and Li, we can cool the two species simultaneously down to quantum degeneracy. Using a Yb and Li mixture, we have done imaging of the cloud in a high magnetic field hoping to see the density profiles of the mixture. As a Yb-Li mixture offers only very limited control of the inter-species interaction by means of Feshbach resonances [6], we are recently focusing on Er-Li mixtures which are predicted to feature numerous inter-species Feshbach resonances [7]. By cooling Er and Li to temperatures well below 10 μ K, we were now able to experimentally confirm inter-species Feshbach resonances between these strongly mass-imbalances species (see Fig. 2).

- [1] J. Kondo, Prog. Theor. Phys. 32, 37 (2005).
- [2] P. W. Anderson. Phys. Rev. 109, 1492 (1958).
- [3] P. W. Anderson, Phys. Rev. Lett. 18, 1049 (1967).
- [4] M. A. Caracanhas, F. Schreck, and C. M. Smith, New J. Phys. 19, 115011 (2017).
- [5] P. Naidon and S. Endo, Rep. Prog. Phys. 80, 056001 (2017).
- [6] F. Schäfer et al., Phys. Rev. A 96, 032711 (2017).
- [7] M. L. González-Martínez and P. S. Zuchowski. Phys. Rev. A 92, 022708 (2015).



Fig. 2. Trap loss observed due to Er-Li inter-species Feshbach resonance.

小角散乱と超遠心分析の統合解析法の確立と タンパク質複合体の構造解明への適用

生体分子構造研究室 宫本洋祐

Abstract. Integrated analytical method with Small-Angle X-ray Scattering (SAXS) and Analytical UltraCentrifugation (AUC) was established for the selective observation of a biomacromolecule in multi-component system. This method was applied to the elucidation of solution structure of a clock protein complex under association-dissociation equilibrium. © 2020 Department of Physics, Kyoto University

生体分子は単一で機能することは稀であり、生理条件下で他の分子と解離会合しながら機能を発現す る。従って、こうした系における生体分子の機能を理解するためには、多様な分子が混在する条件下(= 多成分系)における各々の生体分子の構造解析が求められる。生理条件下(~溶液中)での生体分子の構 造解析手法としてX線小角散乱(Small-Angle X-ray Scattering: SAXS)が知られているが、多成分系では 構成する全成分の集団平均構造データを与えるため、そのままでは目的生体分子のみの構造データを得 ることができない。そこで多成分溶液から目的生体分子のみの散乱データを得るための方法の1つとし て、超遠心分析(Analytical UltraCentrifugation: AUC)を SAXSと組み合わせた「AUC-SAXS法」が開発 された [1]。これまで AUC-SAXS 法では、1種類の生体分子とその凝集体を含む系、及び解離会合平衡 系を別々に取り扱い、生体分子の構造データの導出に成功している。一方、実際の生理条件下では凝集 及び解離会合平衡の共存により複雑な多成分系であることが多く、そのような系に対する AUC-SAXS の適用法は確立していない。そこで本論文では、時計タンパク質 KaiA、KaiC の解離会合平衡系(KaiA+ KaiC ↔ KaiA-KaiC 複合体)を例として、より複雑な多成分系に対する AUC-SAXS 法の確立を行った。

AUC 測定で得られた重量濃度分布 $c(s_{20,w})$ (Figure 1(a))から、KaiA+KaiC 混合溶液中には KaiA (A)、 KaiA 凝集体 (Ag)、KaiC (C)、KaiC 凝集体 (Cg)、KaiA-KaiC 複合体 (AC)の5成分が共存することがわかった。従って、SAXS 測定で混合溶液の得られる散乱プロファイル I(q)は式(1)のように表される。 $I(q) = c_A i_A(q) + c_A g_i i_A g(q) + c_C i_C(q) + c_C g_i c_g(q) + c_A c_A i_A c_A (q)$ (1)

ここで、 c_k は成分 k (= A, Ag, C, Cg, AC)の重量濃度、 $i_k(q)$ は成分 kの単位重量濃度あたりの散乱プロファイル、q は散乱ベクトルの絶対値である。以下に示す手順で混合溶液のI(q) (Figure 1(b)白丸)から AC 複合体の散乱プロファイル $i_{AC}(q)$ を導出した。①:KaiA 及び KaiC 単独溶液に対する AUC-SAXS[1]を行い、 $i_A(q), i_{Ag}(q)$ 及び $i_C(q), i_{Cg}(q)$ をそれぞれ求めた。②:混合溶液に対する $c(s_{20,w})$ (Figure 1(a))より各成分の重量濃度 { c_k }を求めた。③:①と②で得られた各成分の散乱プロファイルと重量濃度、及び I(q)を式(1)に代入し $i_{AC}(q)$ を得た (Figure 1(b) 黒丸)。更に、上記の手順で得られた $i_{AC}(q)$ を再現する構造を粗視化分子動力学計算を用いて探索し、AC 複合体の三次元構造 (Figure 1(b)挿入図)を解明した。



Figure 1. (a) Weight concentration distribution, $c(s_{20,w})$, as a function of sedimentation coefficient, $s_{20,w}$, obtained with AUC measurement. Insets represent the expansions of $c(s_{20,w})$ in 2 S - 7 S (Left) and 14 S - 16 S (Right), respectively. (b) SAXS profiles for KaiA+KaiC mixture (I(q); open circles) and AC complex ($i_{AC}(q)$; closed circles). Inset shows the structure of AC complex built with coarse-grained molecular dynamics simulation.

Reference: [1] K. Morishima et al. Commun. Biol. 3 294 (2020).

FeSe における超流動密度に対する量子幾何補正

凝縮系理論グループ 山下達也

Abstract Superfluid Weight (SWF) leads to Meissner effect and zero DC resistance which define superconductivity. SWF can be separated into conventional contribution and multiband-drived geometrical contribution. we have calculated SFW for monolayer FeSe and found that the geometrical contribution plays an important role.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

Berezinskii,Kosterlitz,Thouless らの研究によって、二次元 XY モデルにおいて低温では KT 相といわれ る準長距離秩序状態が存在することが示された[1]。KT 相とは、渦が互いに強く束縛された状態で自由 に動き回ることができず、そのため系があまり渦励起によって乱されずに秩序だっている相である。し かし、温度が上昇してくると熱揺らぎが大きくなり、そしてある温度 T_{BKT} を超えてくると渦は束縛を破 り自由に動きまるようになり系は無秩序状態へと転移する。この転移を BKT 転移という。転移温度 T_{BKT} は交換相互作用 J を用いて T_{BKT} = π J/2 とあらわすことができる。

BKT転移は二次元XYモデルだけではなく、超流動薄膜や二次元超伝導体おいても起きる現象である。 これらの系において、交換相互作用に対応するものは超流動密度である。超流動密度は有効質量の逆数 に比例する項、つまり単一のバンドごとからくる従来型の寄与がよく知られているが、近年、 Peotta,Törmä らの研究によって、多バンドが存在することによって初めて有限の値を持つ量子幾何学的 な寄与が存在することが解明された[2][3]。従来型の寄与はフラットバンドの極限において0となるので、 準フラットバンドが実現される Twisted Bilayer Graphene 等において超流動密度に関する研究が行われ、 そして量子幾何学的な寄与が大きくなることが確認されている[4]。

本研究では単層 FeSe の超流動密度に対する量子幾何学的補正について研究を行った。単層 FeSe はバルクよりはるかに大きい超伝導転移温度を持つこと、強相関効果に由来する大きな有効質量を持つこと、フェルミ面に多バンドが存在すること、等から量子幾何学的な寄与が重要な役割を果たしていることが期待された。実際、本研究では量子幾何学的寄与が現実的なパラメータに領域において十分大きく、輸送現象や T_{BKT} を考えるうえで無視できないことを確認した。





Fig. 2. Temperature dependence of SWF. The intersection of the SFW and the straight line gives the BKT transition temperature.



- [1] J. M. Kosterlitz et al., Journal of Physics C: Solid State Physics 6 (1973) 1181.
- [2] S. Peotta et al., Nat. Commun 6, 8944 (2015).
- [3] L. Liang et al., Phys. Rev. B 95 (2017) 024515.
- [4] A. Julku et al., New Journal of Physics 20 (2018) 085004.

高分解能X線散乱測定によるナトリウムの運動量分布

不規則系物理学研究室 山本明史

Abstract Valence-electron momentum distribution in sodium in the solid and liquid state were measured by high-resolution x-ray Compton scattering. Discontinuity of momentum densities at the Fermi momentum was observed and renormalization factor Z_F was evaluated. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

電子の運動量分布 n(p) は自由電子ガスモデル(FEG)ではフェルミ・ディラック分布に従い、絶対零度 下ではフェルミ運動量でその値が1から0へと鋭く落ちる階段関数となる。このような不連続性は電子 間相互作用の存在する系でも残るが、その大きさは電子間相互作用の効果が強くなるにしたがって小さ くなることが知られている。すなわち、繰りこみ因子 & はこの大きさを特徴づけるものであり、n(p) と共に量子モンテカルロ(QMC)計算[1]や GM 近似[2]などの様々な理論計算によって導出されてきた。 n(p) や & を実験によって直接測定することは、これら理論計算で用いられている近似の妥当性を議論 するために重要なものとなる。しかしながら、これらの測定には0.01[a.u.]のオーダーの非常に高い運 動量分解能が必要であるため、成功した実験例は非常に少なくデータの蓄積は十分ではない。

n(p) や & を実験で直接測定する方法として、X線コンプトン散乱が良く用いられる。これは、電子の運動量の散乱ベクトル方向への射影であるコンプトンプロファイル(CP)を得る方法であり、フェルミ 運動量などの物理量の情報を得ることが可能である。アルカリ金属は電子ガスモデルでよく記述され、 中でも Na は最も自由電子ガスに近いとされる。そのため、アルカリ金属から得られる情報は電子ガス モデルとの比較が可能となり多くの研究の対象とされてきた。本研究では Na に対してX線コンプトン 散乱実験を行うことで電子の n(p) や & を直接測定することを試みた。

実験は大型放射光施設 SPring-8 の非弾性X線ビームライン BL12XU で行い、エネルギー 25.87[keV]のX線を固体状態と液体状態のNaに照射し、散乱角150°に散乱された 22.33-25.83[keV]の X線を検出した。その結果、0.020[a.u.]という高分解能を得ることができ、従来よりも精度の高い測 定をすることができた。

測定したCPよりナトリウム中の電子の n(p) を導出 した。Fig. 1. に実験で取得した固体状態の n(p) と 理論計算によるもの(分解能関数により畳み込んでい る)との比較を示してある。n(p) にはフェルミ運動量 付近において急激に落ちる様子が確認された。また、 分解能の向上により高精度で α を導出することがで きた。固体状態の α は理論値や過去の測定結果[3]に よるものと良い一致を示していた。図には示していな いが、液体状態の α は固体状態と比べて小さい結果と なり、その減少は密度変化だけでは説明できない大き さとなった。これは、液体状態では構造の不規則性が 増すこととの関連を示唆している。

References

M. Holzmann *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 110402(2011).
 U. von Barth and B. Holm, Phys. Rev. B **54**, 8411(1996).
 S. Huotari *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 086403(2010).



Fig. 1. Experimental electron momentum density of solid sodium. Also shown are theoretical momentum densities of the electron gas with the corresponding electron density, which are convolved with the experimental resolution.

光制御 Slippery 界面と表面ダイレクタの外場応答

ソフトマター物理学研究室 言

吉中智弘

Abstract: By mixing the azo-dye into alignment films, we succeed in arbitrary and reversible controlling the anchoring energy W of the slippery interface under UV light illumination. W is defined by the deformation of the surface director on the slippery interface when a magnetic field is applied. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

【序】液晶-ガラス界面において液晶分子の配向を決めるアンカリングエネルギー (W)は、液晶ディスプレイの表示原理において重要な役割を担う。既存の液晶ディ スプレイではこのWにより、電場 off 時の復元力を得ているが、同時に駆動電圧の 上昇やコントラスト比の低下をもたらしている。そこで、当研究グループでは、Wが 小さく、液晶分子が自由に回転できる界面を Slippery 界面と呼び、駆動電圧の低 減を目標に研究を行ってきた。本研究では、Wの大きさを任意に制御するために、 UV 光照射で光異性化を起こすアゾ分子を用いることを考えた。アゾモノマーを他 のモノマーと一緒に共重合させ、ガラスセル基板上に高分子ゲル膜を形成するこ とで、UV 光を用いて Slippery 界面のWの大きさを制御することに成功した。また、 Wの大きさは磁場印加時の界面ダイレクタの変位から決定した。

【実験と結果】PEG-methyl ether acrylate と PEG-diacrylate を 1:3 で混合した溶 液に、さらに acrylate 基を有するアゾ分子の混合比を変化させ混合した溶液 を作製した。この溶液をガラス基板表面に塗布し、UV 光照射によって架橋

 $\phi_{\rm s}[\rm deg]$

重合した。これを2枚貼り合わせて作 製したセルにネマチック液晶(E44)を 注入し、Fig.1に示す装置を用いて、磁 場印加下での透過光強度*I(t)*の変化を 測定し、界面ダイレクタφ_s(t)の変位を 解析した。

【実験と結果】 $d \ll l \ll \xi(\tau) \mu p d$ 、磁場コヒーレンス長 $\xi = \sqrt{\frac{K_2}{\mu_0^{-1} \Delta \chi}} \frac{1}{B}$ 、アンカ

リング
$$l = \frac{K_2}{W}$$
)を満たすセルを作製し

た。ここで、磁場強度B、磁気感受率異方性 $\Delta \chi$ 、真空の透磁率 μ_0 、ツイスト弾性定数 K_2 である。等方相からの磁場配向により決定されたアンカリング方向と、磁場印加方向のなす角が45°となるようにセルに平行な磁場を印加する。磁場印加時間は15secである。透過光強度I(t)を測定し、 $I(t) = I_0 \sin^2 2\phi_s(t)$ を用いて、 $\phi_s(t)$ に変換する(Fig.2)。面内磁場印加時の自由エネルギーの式からトルクバランス状態における ϕ_s の最大値 ϕ_s steadyの近似解は

$$\phi_{\text{s_steady}} = \frac{dl}{4\xi^2} = \frac{\mu_0^{-1} \Delta \chi d}{4W} B^2$$

である。そこで、 ϕ_{s_steady} の磁場強度B依存性を測定し、 ϕ_{s_steady} の B^2 に対する傾きからWの大きさを求めた。 UV 光照射時に傾きが増加することから、 ϕ_{s_steady} は増 大しており、Wが減少していることが分かる(Fig. 3)。 さらに、アゾ分子の混合比を変化させた界面でWの大 きさを求めた(Fig. 4)。以上の結果、①アゾ分子の混合 比、②UV 光照射により、Wの大きさを任意に、また光 照射により可逆に制御することに成功した。



Fig.4: Variation of W with mixing ratio of azo-dye



Fig.1: Schematic image of the magnetic field measurement system

