平成23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

2012年1月31日(火)、2月1日(水)

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)

2012年1月31日(火)9:00~ 開始													
目 次													
1. 強相関ヘテロ界面における磁気的性質の解析	上田	克	(9	:	0	0)	•	•	•	•	•	1
2. 共役変数・非共役変数に関する応答と揺らぎ	上田	仁彦	(9	:	2	0)	•	•	•	•	•	2
3. フェルミ粒子集団の衝突ダイナミクスにおける多体効果	尾崎	順一	(9	:	4	0)	•	•	•	•	•	3
4.非 Gauss 過程の揺らぎのエネルギー論	金澤輝	軍代士	(1	0	:	0	0)	•	•	•	•	•	4
5. トポロジカル絶縁体接合系のギャップレス・モードと A 電磁気学:full guantum な扱いについて	xion												
	塩崎	謙	(1	0	:	2	0)	•	•	•	•	•	5
$1 \ 0 \ : \ 4 \ 0 \sim 1 \ 0 \ : \ 5 \ 0$	休憩												
6.鉄系超伝導体反強磁性相における電荷励起の理論	杉本	高大	(1	0	:	5	0)	•	•	•	•	•	6
7.2 成分流体系の数値計算によるファラデー波の研究	髙木俶	建太郎	(1	1	:	1	0)	•	•	•	•	•	7
8. 変分モンテカルロ法による多軌道系電子系における相関	効果の) 竹中	解析 裕斗	(1	1	:	3	0)	•	•	•	•	•	8
9. Dynamics of a deformable self-propelled particle under	r exteri 多羅問	nal for 間充輔	cing (1	g 1	:	5	0)	•	•	•	•	•	9
10.ダイヤモンドにおける励起子微細構造を利用した冷却電	子正孔 挾間	系の実 優治	現 (1	2	:	1	0)	•	•	•	•	•]	ιo
$1 \ 2 \ : \ 3 \ 0 \sim 1 \ 3 \ : \ 3 \ 0$	昼休み	, ,											
11. 高分子溶液のミクロ相分離:擬二次元空間でのパターン	ダイナ 林	ミクス 仁志	(1	3	:	3	0)	•	•		•	•]	 1 1
1 2. p 型半導体 Ge:Ga のテラヘルツ非線形分光	向井	佑	(1	3	:	5	0)	•	•	•	•	•]	12

13. 極低温イッテルビウム原子の超精密光会合分光とその重力	力逆二 <u>;</u> 山田	重則の 裕貴	検証 (1	E^ 4	、の :)応 1	;用 0)	•	•	•	•	•	13
14. 光格子中の Yb 原子の単一格子点観測及び操作に向けた財	₿発 山本	隆太	(1	4	:	3	0)	•	•	•	•	•	$1 \ 4$
15. ショ糖単結晶における分子間振動モード	足立安	安比古	(1	4	:	5	0)	•	•	•	•	•	15
16.一軸性圧力印加によるモット絶縁体 Ca ₂ RuO ₄ の電子状態	©の制御 石川	p 諒	(1	5	:	1	0)	•	•	•	•	•	16
$1 5 : 3 0 \sim 1 5 : 4 0$	休憩												
17.SiGe 混晶量子ドットにおける高密度キャリアダイナミク	ス 上田	碁 志	(1	5	:	4	0)	•	•	•	•	•	17
18. ディラック電子と通常電子が共存する場合の輸送現象	江口	渡	(1	6	:	0	0)	•	•	•	•	•	18
19.磁場侵入長測定による異方的ギャップ構造を持つ鉄系超	云導体 勝股	BaFez 亮	2(As (1	1-x 6	Px :) ₂ (2	の の 0)	开究 •	1 L •	•	•	•	19
20. 有限量子系の熱伝導の線形応答	紙谷	典和	(1	6	:	4	0)	•	•	•	•	•	20
21. UCoAlにおける臨界終点近傍の磁気励起の研究	軽部	皓介	(1	7	:	0	0)	•	•	•	•	•	21
22.スメクチック液晶層間のヘテロな高分子化 C-director ダ	イナミ 川本	クス 道久	(1	7	:	2	0)	•	•	•	•	•	22
2012年2月1日(水)9:00~													
23. 非弾性 X 線散乱による液体 Rb のプラズモン測定	木村	耕治	(9	:	0	0)	•	•	•	•	•	23
2 4. Diffusion of nuclear spin polarization in bilayer quantu NGUYEN	ım Ha MINH	ll syst HAI	ems (; 9	:	2	0)	•	•	•	•	•	24

25.コアシェル型半導体ナノ量子ドット CdSe/ZnS の点滅現象

楠田 良介 (9:40)・・・・25

26.鉄系超伝導体 BaFe2(As1-xPx)2の正方晶相における回転対称の破れ

史 宏杰 (10:00)・・・・26

27.Hindered SmC 相に誘起される異常臨界現象

鈴木大二朗(10:20)・・・・27

 10:40~10:50
 休憩

 28.トポロジカル超伝導接合 Pb/Ru/Sr₂RuO₄の磁場応答
 驚見 拓哉 (10:50)・・・・28

 29.希土類元素希釈系におけるスピンホール効果の研究
 水田 真己 (11:10)・・・・29

 30.タンパク質分子改変による会合状態の制御と光散乱解析
 長谷川公寛 (11:30)・・・・30

 31. CeCoIns の FFLO 相と反強磁性秩序の角度依存性
 細谷 健一 (11:50)・・・・31

 32.2次元人工近藤格子における超強結合超伝導
 水上 雄太 (12:10)・・・・32

 12:30~13:30
 昼休み

33. ランダムヒューズ模型を用いた混合系の破壊強度の研究

宮城 俊吾(13:30)・・・・33

34. ネオンクラスターの EUV-FEL 強度変化に伴う光イオン化機構のクロスオーバー
 八瀬 哲志(13:50)・・・・34

35. 行列積波動関数を用いた量子多体系のエンタングルメントについての研究 吉田 清高(14:10)・・・・35

強相関ヘテロ界面における磁気的性質の解析

凝縮系理論グループ 上田克

Abstract We present a theoretical study of the model heterostructure composed of the Mott-insulator sandwiched by the band-insulators. We find intriguing magnetic/charge phase transitions at the interface, closely related to the charge density profile. We elucidate that these transitions are driven by the strong coupling between charge and spin degrees of freedom.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

遷移金属酸化物に代表される強相関電子系では、巨大磁気抵抗効果や高温超伝導などの著しい物性を 示すことが知られており、その研究は多岐にわたる広がりを見せている。こうした強相関電子系研究に おいて近年急速な発展を見せている分野の一つに、遷移金属酸化物のヘテロ接合系がある。一般に、結 晶表面や界面では、電荷移動や格子の不整合性のために界面の電子状態が大きく変化する。そのため、 酸化物ヘテロ界面では、こうした系の非一様性と、電子の持つスピン・電荷・軌道自由度との競合のた めに、バルク結晶では実現しないような秩序相の競合や新奇な電子相の出現が期待されている。例えば、 SrTiO₃/LaTiO₃ やSrTiO₃/LaAlO₃などの絶縁体界面では、金属的な振る舞いや超伝導、磁性などの出現も 報告されており、強相関界面における多彩な秩序相の存在が明らかになり始めている[1,2]。このように、 強相関ヘテロ接合は強相関電子系の研究における新たな切り口として注目されており、精力的な研究が 進められている。

本研究では、SrTiO₃/LaTiO₃に代表されるバンド絶縁体とモット絶縁体の接合系を対象にして、強相 関界面における磁気的性質について議論した。一般に、強相関接合の界面電子状態は、オンサイトの電 子間斥力に加えて、長距離クーロン相互作用に強く影響されることが知られている。事実、絶縁体接合 における金属相の出現は、これらの効果がもたらす電荷分布の空間変化が起源であると指摘されている [3]。そこで、ハバードモデルに長距離クーロン相互作用項を導入したモデルを用いて、基底状態におけ る界面電子状態について系統的な解析を行った。なお解析ではHartree-Fock近似を用いた。

得られた電子相図をFig.1に示す。界面の電子状態は長距離 クーロンの大きさEcに強く影響され、キャント磁性相(CA)や チェッカーボード型の電荷秩序相(CO)など、さまざまな電 荷・磁気構造を示す。さらに興味深いことに、これらの電荷・ 磁気秩序相の出現は、系の電荷分布の非一様性に強く依存し ていることが分かった。特に、ハバード相互作用U≥9での電 荷秩序の出現は、界面とモット絶縁体との磁気的相互作用を 起源とする、強相関へテロ接合に特有な現象であることを明 らかにした[4]。

さらに、本研究では、磁場下での接合系の物性についても 解析を行った。その結果、磁場によって誘起される電荷秩序 相の存在や、磁化曲線にメタ磁性転移的な振る舞いが生じる ことを新たに見出した(Fig.2)。加えて、こうした振る舞いは 接合系の界面近傍でのみ確認でき、電荷と磁気構造の変化が、 互いに強く影響し合っていることが分かった[4,5]。

References

[1] A. Ohtomo, and H. Y. Hwang, Nature (London)427, 423 (2004)

[2] A. Ohtomo, et al., Nature (London) 419, 378 (2002)

[3] S. Okamoto, and A. J. Millis, Phys. Rev. B. 70, 241104 (2004)

[4] S. Ueda, *et al.*, submitted to J. Phys. Soc. Jpn., and S. Ueda, *et al.* in preparation.

[5] S. Ueda, et al., J. Phys.: Conf. Ser., in press



Fig.1. A ground state *Ec-U* phase diagram.



Fig.2. Plot of the interface magnetization.

共役変数・非共役変数に関する応答と揺らぎ

非線形動力学研究室 上田仁彦

Abstract We examine the violation of Fluctuation Dissipation Relation (FDR) in several non-equilibrium situations, and show that Harada-Sasa equality can be extended to these situations. Furthermore, we have studied the physical meanings of the off-diagonal components of the violation of FDR. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

近年のナノテクノロジーの発展で揺らぐ環境にある系の一分子レベルでの測定と制御が可能になったために、これらの実験状況を記述する理論が必要になりつつある。一つの成功例は stochastic energetic[1]であり、これは環境と比べて時間スケールがうまく分離される系の熱力学的記述を可能とした。今後も測定装置の揺らぎや物質のミクロな性質など実験環境の個別性を陽に取り入れた理論が実験系の記述に必要とされるものと期待される。また、今までに作ることのできなかった実験状況をミクロレベルから設計することも可能となると考えられ、これらの記述には用いた装置の性質が含まれなければならないことは言うまでもない。

一般に物理学においては、実験との対応が明確な理論を作ることが健全であると考えられており、測定可能量を用いて系の記述を行うことが重要となる。測定可能な量を用いた関係式として平衡統計力学でとりわけ重要なものが、平衡状態における揺らぎと摂動力を加えたときの応答の間の揺動散逸関係式である。非平衡領域ではこのような一般的な関係式は存在しないと考えられているが、近年、揺らぎと応答の関係は sum rule の形では記述可能であり揺動散逸関係式の破れが測定可能な量と結びつく場合があることが示されている[2]。

ところで、ミクロな制御機構が自然にまたは人為的操作のために存在する場合、ある変数を用いて共 役な関係にない変数の制御が行われる状況は頻繁に見られる。例えば、pulsing rachet[3]は大域的外 力を加えることなしに粒子の流れを取り出すことのできるモデルである。こうした状況が生体分子系の ようなミクロ系では頻繁に現れるため、外場と応答のクロス効果の性質を調べることが小さな非平衡系 の解析において重要となる。

今回我々はカレントの種類が複数存在しうる非平衡状態における揺動散逸関係式の破れの検証を行った。モデルとして、格子熱伝導モデル、非線形振動子、シア下のコロイド粒子を用い、本来は周期ポテンシャル中の非保存力に支配されたブラウン粒子に対して示されていた Harada-Sasa 等式[2]

$$\langle q \rangle_0 = \gamma \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{2\pi} \left[C(\omega) - 2k_B T \widetilde{R}'(\omega) \right]$$

 $(\langle q \rangle_{0}$ は熱浴に散逸される熱流、 $C(\omega)$ は速度の相関関数のフーリエ変換、 $\widetilde{R}'(\omega)$ は摂動力を加えた

ときの速度の応答関数のフーリエ変換の実部)がこれらの系にも拡張されることを示した。また、応答 関数の非対角成分についての考察を行い、系に温度差がある場合やシアのような非保存力がかかってい る場合の Onsager の相反関係式の破れの表式を具体的に表現し、測定可能な量と結びつく場合があるこ とを示した。さらに、共役な場に対する応答と非共役な変数の変化に対する応答の性質の違いについて も考察を行った。これらの結果は、ミクロ系のある物理量を多数の場を用いてコントロールするような 状況の解析に役立つものと考えられる。発表ではこれからの展望についても述べたい。

- [1] K. Sekimoto, Stochastic Energetics (Lecture Notes in Physics) (Springer, Berlin, 2010).
- [2] T. Harada and S.-i. Sasa, Phys. Rev. Lett. 95, 130602 (2005).
- [3] P. Reimann, Phys. Rep. 361, 57-265 (2002).

フェルミ粒子集団の衝突ダイナミクスにおける多体効果

凝縮系理論研究室 尾崎 順一

Abstract We have studied collision dynamics of fermion clusters, and simulated one-dimensional Fermi systems by applying the time-dependent density matrix renormalization group method. We have revealed quantitative differences between quasi-classical results and quantum simulation results when the particles are strongly correlated and the interaction is strong.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

近年,冷却原子を用いた**量子ダイナミクス**の実験が盛んに行われている.冷却原子を用いれば,理想 的な孤立量子系を実験室内で実現できる.冷却原子系では粒子のポテンシャルを操作でき,スピンに依 存させることもできる.さらにフェッシュバッハ共鳴を用いることで,粒子間相互作用さえも調節でき る[1].これらの技術の発展により,基底状態にある強相関系のパラメタを急に変え,その後のダイナ ミクスを追う量子クエンチの実験が可能になり[2],非平衡量子系の大きな研究舞台となっている.

本研究では MIT グループのスピン輸送の実験[3]からヒントを得て,古典力学の結果と対比可能な2 つの系における量子ダイナミクスを計算した.この結果を古典力学と対比し差異とその機構が明らかに なれば,それは複雑な量子ダイナミクスに対して1つの近似的な見方になると考えられる.

手法は,量子相関をすべて含みつつダイナミクスを正確に扱う事ができる,時間依存密度行列繰り込み群[4]を用いた.そして冷却原子の点相互作用を扱うために,サイト間のホッピングとオンサイト相互作用で構成される,スピン1/2のFermi-Hubbard model で2つの系を表現し計算を行った.

<u>結果(i)</u>:1つ目の系は1次元上でスピンの異なるフェルミ粒子集団同士を十分速く衝突させる.そして,粒子同士の相互作用の強さによって粒子集団は反射されたり透過したりする.その際の粒子集団の反射率,透過率を計算し,その結果を準古典的に考えたときの結果と比較した.

その結果,相互作用が弱い領域では準古典的な結果と一致した.しかし相互作用が強い領域では異なり,準古典的な場合よりも,(集団中の)粒子数倍だけ透過しやすいことが判明した[5].

<u>結果(ii)</u>:2つ目の系は1次元上でスピンの異なるフェルミ粒子集団同士を,強制力により低速で衝 突させ,そのまま引きずって透過させる.すると粒子同士の相互作用により集団は励起される.その励 起エネルギーを,引きずる速度,相互作用の強さ,粒子数を変えつつ調べた.

その結果,相互作用が強いときに励起エネルギーは粒子数に依存せず,1粒子どうしの引きずりのエネルギーとほぼ一致した.準古典的に考えればエネルギーは粒子数の2乗で増えるはずだが,それより小さい励起で透過することが明らかになった.

以上の2つの系の結果をまとめると、準古典的な描像による結果よりも、実際の量子論的な結果のほうが、相互作用が強い領域において透過しやすい.高速衝突の場合は集団の粒子数倍だけ透過しやすく、低速透過の場合は、粒子数の2乗倍だけ励起エネルギーが小さい.この古典との差は粒子同士の重なりや相関の効果、つまり**量子多体効果**である.

この多体効果の強さは、相互作用の強い極限では集団の粒子数のみに依存する簡単な関数であり、また透過しやすい方向に働く事が2つの結果により示された.この性質は量子力学の、特に基底状態近傍の1つの側面を表したものであり、例えば古典MDなどの誤差を評価する際に有用であると考えられる.

References

[1] C. Chin, R. Grimm, P. Julienne and E. Tiesinga, Rev. Mod. Phys. 82, 1225 (2010).

[2] L. E. Sadler, J. M. Higbie, S. R. Leslie, M. Vengalattore and D. M. Stamper-Kurn, Nature 443, 312 (2006).

[3] A. Sommer, M. Ku, G. Roati and M.W. Zwierlein, Nature 472, 201 (2011).

[4] S.R. White and A. E. Feiguin : Phys. Rev. Lett. 93, 076401 (2004).

[5] J. Ozaki, M. Tezuka and N. Kawakami, arXiv: 1107.0774 (2011).

非 Gauss 過程の揺らぎのエネルギー論

物性基礎論:統計動力学研究室 金澤 輝代士

Abstract By introducing a new stochastic integral, we investigate the energetic of classical stochastic systems driven by non-Gaussian white noises. In particular, we introduce a decomposition of the total-energy difference into the work and the heat for each trajectory. Some physical models driven by non-Gaussian noises are investigated analytically.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

室温の水中の単一高分子のような微小系の熱力学構造を論ずる揺らぎのエネルギー論は、Gauss過程の みを論じており[1,2],非Gauss過程を論じていなかった.これは確率過程特有な数学的困難に起因する. 非Gauss過程では、熱力学量を定義する確率積分が知られていなかったからだ.そこで本研究では、非 Gauss過程での新たな確率積分を導入し、揺らぎのエネルギー論の非Gauss過程に拡張した[3].

揺らぎのエネルギー論の定式化においては次の2点の数学的問題点がある:

(1)熱力学量を定義する為に,通常の計算規則が使用出来る解析方法が必要である,(2)熱流の計算の際に現れる,多体デルタ関数の端点を含む積分値を特定する必要がある.

本研究では問題点(1)を解決する為に、伊藤解析とStratonovich解析とは異なる新たな確率解析である *-解析を定式化した.*-解析は有色ノイズからの白色極限として定式化されており、chain-rule, Leibniz-ruleといった通常の計算規則が使用出来る.*-解析から伊藤解析に変換する公式を導出し、既 存の解析方法との対応関係を明らかにした.また、*-解析を用いて多体デルタ関数の積分値を導出し、 問題(2)を解決した.

これらを用いて非Gauss過程の揺らぎのエネルギー論の定式化を行った.*-解析を用いてエネルギー流 を熱流と仕事流に分離することに成功した.*-解析から伊藤型への変換公式を用いることで実験的な熱 測定公式の導出に成功した.具体的な例として次の2つを扱った:

- (1) Poisson熱浴中での自由Brown運動,
- (2) Gauss熱浴とPoisson熱浴の間の熱伝導現象.

(1)のモデルを解析することで,非Gauss性が支配的になる為の条件の導出に成功した.また,(2)のモデルを解析することで,同じ分散の熱浴間で熱流が定常的に流れる非自明な現象を発見した.これは,一般の微小系では分散では熱浴を特徴付け出来ないことを意味している.

次に,伊藤型確率過程においてもエネルギー論を定式化する為に,*-解析を更に一般化し,*-積を導入 し,伊藤積との混合積を定義した.混合積を導入することで,伊藤型確率過程でも通常の計算規則が形 式的に成立する定式化を行った.また,高速な数値解析を行う方法論を議論した.混合積を揺らぎのエ ネルギー論に応用することで,伊藤型確率過程でのエネルギー論を定式化した.これによって,幅広い 確率過程に対してエネルギー論を定式化することに成功した.

- [1] Ken Sekimoto, Prog. Theor. Phys. Suppl. 130, 17 (1998).
- [2] Ken Sekimoto, Stochastic Energetics (Springer-Verlag, Berlin, 2010).
- [3] Kiyoshi Kanazawa, Takahiro Sagawa, and Hisao Hayakawa, arXiv: 1111.5906 (2011).

トポロジカル絶縁体接合系のギャップレス・モードと Axion 電磁気学:full quantum な扱いについて

凝縮系理論グループ 塩崎謙

Abstract We propose a full quantum formulation for the topological invariants characterizing line defects in three-dimensional insulators with no symmetry, and demonstrate nontrivial topology in the topological insulator-ferromagnet tri-junction systems. We also argue a full quantum calculation for the Axion electrodynamics and the index theorem. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

近年、凝縮系物理学において、トポロジカルな新奇現象が注目されている。その代表例であるトポロ ジカル絶縁体・超伝導体とは、運動量空間においてトポロジカルに非自明な基底状態を有する物質群の 総称であり、バルクにエネルギーギャップを持つにも関わらず、系の表面にギャップレス励起が現れる ことで特徴づけられる。バルクの基底状態のトポロジカルな分類と表面におけるギャップレスモードの 対応関係はバルク-エッジ対応として知られている。基底状態のトポロジカルな特徴付けは、接合系の ような、バルク相ではない非一様な系へも拡張されている。3次元 Z2トポロジカル絶縁体の電磁気現象 を記述する Axion 電磁気学[1]や、絶縁体中のトポロジカル欠陥に局在するギャップレス状態のトポロ ジカルな分類[2]は特に成功している例である。両者のこれまでの研究は、共に以下に述べるような断 熱近似に基づいている。基底状態と第一励起状態との間のエネルギーギャップ(バンド絶縁体ならバン ドギャップ)が閉じない条件の下、接合表面を仮想的に滑らかにすることにより、非一様性から生ずる 量子補正を無視し、運動量空間に加えて実空間のトポロジーを同時に扱う半古典的ハミルトニアンを考 えることによって、非一様な系の示すトポロジカルな性質を議論する。しかし、断熱近似が系の低エネ ルギー状態を記述しているかは自明ではない。実際、トポロジカル絶縁体-強磁性体(TI-FM)接合系を半 古典的に扱うとエネルギーギャップが消失し、上述の議論が適用できなくなる。Full quantum な扱いで はギャップが存在することが知られているので、この系では半古典近似そのものが適用できないことを 意味している。そこで、本研究では非一様な絶縁体に現れるトポロジカルな現象の断熱近似によらない full quantum な定式化を目指した。得られた結果は以下のとおりである。

1.時間反転対称性の破れた接合系における、線欠陥に局在するギャップレス・モードを特徴付ける トポロジカル数について、Green 関数を用いた full quantum な定式化を行った。また具体例として、Fig. 1

のようなトポロジカル絶縁体-強磁性体-強磁性体接 合系に対し、厳密に解ける模型を構築し、非自明なト ポロジカル数の存在を確かめた[3]。

2.前述の厳密に解ける模型を用いて、TI-FM 接合に おける Hall 伝導率を評価し、Axion 電磁気学の結果を 厳密な量子計算から再現した。

3. 接合系におけるギャップレス・モードの存在を より厳密に定式化するため、一般化された指数定理を 導いた。また、その結果、TI-FM 接合系において、従 来の断熱近似理論では見逃されていた新しいギャッ プレス・モードが存在することを見い出した[4]。

References

[1] X. L. Qi et al., Phys. Rev. **B**78, 195424 (2008).

[2] J. C. Teo, and C. L. Kane, Phys. Rev. B82, 115120 (2010).[3] Ken Shiozaki and Satoshi Fujimoto, arXiv:1111.1685.

(submitted to PRB.)

[4] Ken Shiozaki, Takahiro Fukui, and Satoshi Fujimoto, in preparation.



Fig. 1. The heterostructure geometry for the topological insulator-ferromagnet insulator(FMI) tri-junction.

鉄系超伝導体反強磁性相における 電荷励起の理論

物性基礎論:凝縮系物理研究室 杉本高大

Abstract The anisotropy of optical and electric conductivity is observed in antiferromagnetic metaric phase of iron-based superconductors. We theoretically investigated the origin of this anisotropy and found that the orbital degrees of freedom and Dirac cone-like dispersion are important for the anisotropy. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

2008年に発見された鉄系超伝導体は、超伝導転移温度の高さと組成の組み合わせの豊富さから、多くの研 究者の注目を集めている。従来の高温超伝導体である銅酸化物と同様に、キャリアをドープしていない母物質で は温度を下げても超伝導にならず、磁性相となる。本研究では鉄系超伝導体の物性の解明のため、磁性相の励 起構造に着目した。

我々は鉄系超伝導体母物質の一つである BaFe₂As₂(122 系)について調べた。鉄原子は二次元正方格子を 成しているが、ネール温度以下で反強磁性相になると同時に構造相転移も起こり、Fe-Fe ボンド長の短い方に 強磁性的で、それに垂直な方向に反強磁性的なストライプ模様にスピンがオーダーする。BaFe₂As₂単結晶に一 軸圧力を加えることで detwin した試料を用いた実験から、構造相転移温度よりも少し高い温度から下の温度 で光学伝導度に異方性が現れることがわかっている [1, 2]。これらの実験によると、低エネルギーでは反強磁性 方向の光学伝導度が強磁性方向のそれよりも大きくなるが、高エネルギーではその大小関係が逆転する。

我々はまず磁気秩序が生じている状態を考え、5軌道ハバード模型の平均場近似にスピンの秩序を考慮し、 秩序パラメータを自己無撞着に解くことで基底状態の波動関数とエネルギーバンド分散を数値的に導出した。 この結果を用いて、直接遷移に基づく光学伝導度を求めると、実験と一致した傾向の異方性を見出すことができ

た(Fig. 1)。我々はこの異方性が次の二つの要素に起因することを突き止めた[3]。一つはバンド間遷移の始状態と終状態の電子軌道のパリティで、もう一つはバンド構造における線形分散(ディジック分散)である。

7990分配)である。 さらに磁気秩序が起こっていない状態での光 学伝導度の異方性を考えた。本来は結晶構造の 対称性により、軌道 *d*_{xx} と *d*_{yz}のエネルギーは縮 退しているが、構造相転移により対称性が破れ ることで縮退が解かれる。また圧力によって detwin することで構造相転移よりも高い温度で 対称性の破れが起こっていると考えられる[4]。 縮退が解かれることで生まれる光学伝導度の異 方性についても議論する。



Fig. 1 Optical conductivity along the x direction (antiferromagnetic direction) and the y direction (ferromagnetic direction).

References

[1] A. Dusza et al., EPL 93, 37002 (2011).

- [2] M. Nakajima et al., Proc. Nat. Acad. Sci. 108, 12238 (2011).
- [3] K. Sugimoto et al., J. Phys. Soc. Jpn. 80, 033706 (2005).
- [4] M. Yi et al., Proc. Nat. Acad. Sci. 108, 6878 (2011).

2成分流体系の数値計算によるファラデー波の研究

流体物理学研究室 高木健太郎

Abstract Faraday waves are studied by means of a numerical simulation of a binary fluid system. We focus on the period-tripling state in the two dimensions and the hexagonal pattern in the three dimensions. © 2011 Department of Physics, Kyoto University

ファラデー波は周期外力によって垂直加振された流体の界面に現れる、多角形パターンを示す定在波である。 ファラデーの発見から 200 年弱の歴史があるが、現在でも新たな強非線形現象を観測した実験が報告されてい る。例えば、局所的な定在波 (Oscillon[1] と呼ばれる) がある。他方で、2 成分流体系 (2 流体で密度と粘性が異 なる系)としてファラデー波の線形安定性解析、弱非線形解析等が行われたのは 1990 年代半ばからのことであ る。さらに 2 成分流体系の 3 次元数値計算が行われたのは 2009 年のことである [2]。強非線形なファラデー波 の理解には 2 流体間の相互作用が重要なので、この現象の解明に 2 成分系の 3 次元数値計算が役立つと期待さ れている。

新しい強非線形なファラデー波では、Oscillon など界面が多価になる現象が多く報告されているが、文献 [2] の方法では多価な界面に適用できない。そこで本研究では多価な界面にも適用可能であるフェーズフィー ルド法 (PFM) を用いて 2 成分流体系の数値計算を行った。フェーズフィールドの支配方程式は移流項をもつ Cahn-Hilliard 方程式である。この PFM の線形領域での妥当性は数値計算結果と線形安定性解析を比較するこ とによって確認した [3]。強非線形での妥当性は後述する現象の再現によって確認する。

空間 2 次元では、近年実験で報告されている新たな現象である period-tripling 現象 [4] を対象とする。これ は、周期解から 3 倍周期解に遷移しファラデー波の振動周期が基本周期の 3 倍となる現象であり、そのメカニ ズムは未解明である。我々はこの period-tripling 現象を 2 次元数値計算で再現した [3]。Fig.1 は数値計算によ る period-tripling の界面変位の時間発展とそれぞれのピークでの界面の様子である。現在、系統的なデータを 取得してメカニズムの解明を進めている。

さらに空間3次元では、Oscillonのように界面が多価となる強非線形現象に取り組む前の試験的研究として、 まず多価性のないパターン形成領域のファラデー波を対象とする。3次元数値計算ではファラデー波の実験[5] において六角形パターンを観測した際の物性値を用いた。Fig.2に本計算の瞬間場における流体界面を示す。こ の図は界面がホワイトノイズの初期状態から出発して定常解に到達前のスナップショットである。自発的に六 角形パターンが選択されていることがわかる。



Fig.1 (a)Surface elevation at tripling state. (b)(c)(d) Surface profile at each peak.



Fig.2 The Surface profile of hexagonal pattern at time/period = 10.3.

- [1] H.Arbell and J.Fineberg, Phys. Rev. Lett. 85:756–759 (1999).
- [2] N.Périnet, D.Juric and L.S.Tuckerman, J. Fluid Mech. 635:1-26 (2009).
- [3] K.Takagi and T.Matsumoto, J. Fluid Mech. 686:409-425 (2011).
- [4] L. Jiang, M. Perlin, W. W. Schultz, J. Fluid Mech. 369:273–299 (1998).
- [5] A.V.Kityk, J.Embs, V.V.Mekhonoshin and C.Wagner, Phys. Rev. E 72:036209 (2005)

変分モンテカルロ法による多軌道系電子系における 相関効果の解析

凝縮系理論グループ 竹中裕斗

Abstract In order to clarify the effects of orbital degrees of freedom in multi-orbital systems, we investigate two-orbital Hubbard model and Bernevig-Hughes-Zhang model. We perform these analyses with variational Monte Carlo method and discuss the effects of electron correlations and spin-orbit interaction.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

軌道自由度を有する系では、軌道内のクーロン相互作用に加え、軌道間クーロン相互作用・フント結合、さらにはスピン軌道相互作用などの効果により多彩な物性を示す。たとえば、Sr2-xCaxRuO4において引き起こされると主張されている軌道選択型モット転移がある。軌道選択型モット転移とは、すべての伝導電子が金属である状態から、一部の軌道の電子が局在化する一方残された軌道の電子は遍歴性を保っている状態への転移である。SrをCaに置換していくとバンド幅が減少し、バンド幅の狭い軌道において有効的なクーロン相互作用が強まり、金属絶縁体転移が起こることが指摘されている[1]。また、近年注目を集めている例として、Bernevig-Hughes-Zhangらによって提唱されたHgTe/CdTe量子井戸におけるトポロジカル絶縁体が挙げられる[2]。この系では、スピン軌道相互作用により、バルクにエネルギーギャップ、エッジにギャップレスのモードをもつ時間反転対称性のあるバンド構造が現れる。トポロジカル絶縁体は一体問題で記述されるがさらに電子相関効果により新奇な相が実現されると期待されている。このように、多軌道系では、電子間相互作用・スピン軌道相互作用が複雑に絡み合うため、それらの効果を系統的、統一的に解析することが求められる。

そこで本研究では、軌道自由度を有する系に着目し、(i)2軌道ハバードモデルと(ii) Bernevig-Hughes-Zhangモデルについて解析を行った。解析手法として、弱相関領域から強相関領域まで 幅広い範囲において解析可能な変分モンテカルロ法(VMC)を用い解析を行った。

(i)2軌道ハバードモデル

試行関数として局所相関である Gutzwiller 相関効果と最近 接サイト間のダブロン・ホロン相関効果を取り入れ、クー ロン相互作用 U,U'の値を変えて金属-モット絶縁体転移を 調べた(Fig.1)。エネルギー、運動量分布関数、スピン構造 因子の計算を行い、従来の変分法では困難であったモット 転移の共存相およびヒステリシスをフント結合の効果を考 慮することによって明らかにした[3]。

<u>(ii)Bernevig-Hughes-Zhangモデル</u>

スピン軌道相互作用を取り入れBernevig-Hughes-Zhangモデルの解析を行った。運動量分布関数を用いてヘリカルなエッジ状態が存在することを示した。さらには(i)の試行関数を発展させ空間に依存した変分パラメータを導入し、非一様な系であるトポロジカル絶縁体での解析を可能にし電子相関効果について明らかにした。



- [1] A. Koga et al, Phys.Rev.Lett. 92 216402 (2004).
- [2] B.A. Bernevig, T.L. Hughes and S.C. Zhang, Science 314 1757 (2006).
- [3] Y. Takenaka and N. Kawakami, J. Phys: Conf. Series. (in press).





Dynamics of a deformable self-propelled particle under external forcing

Nonlinear Dynamics Group Mitsusuke Tarama

Abstract We investigate the dynamics of a deformable self-propelled particle under external forces based on the time-evolution equations for the centre of mass and a tensor variable characterising deformation. A rich variety of dynamical states are obtained from numerical simulations. A theoretical analysis is also carried out to clarify the dynamics. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

We investigate the dynamics of a deformable self-propelled particle under external forces in a two-dimensional space. The time-evolution equations we consider consist of the velocity of the centre of mass v_{α} and a tensor variable $S_{\alpha\beta}$ characterising deformations;

$$\frac{dS_{\alpha\beta}}{dt} = -\kappa S_{\alpha\beta} + b \left(v_{\alpha} v_{\beta} - \frac{1}{2} |v^2| \delta_{\alpha\beta} \right) + Q_{\alpha\beta}$$
(2)

where γ characterises the spontaneous propulsion and κ represents the deformability of the particle. Here, we consider two kinds of external force. One is a gravitational force g_{α} , which enters additively in the time-evolution equation for the centre of mass. The other is an electric force E_{α} supposing that a dipole moment is induced in the particle. This force is added to equation (2) as $Q_{\alpha\beta}$ which is defined by

$$Q_{\alpha\beta} = h \left(E_{\alpha} E_{\beta} - \frac{1}{2} \left| E^2 \right| \delta_{\alpha\beta} \right)$$

The system we consider is simply a single particle but has internal degrees of freedom due to deformability. It should be noted that, even when the external forcing is absent, there is a bifurcation between a straight motion and a rotating motion [1]. Therefore, by adding an external force, there occurs a frustration between the rotating motion and the forced straight motion. As a result, a variety of non-trivial dynamical states are obtained by changing the magnitude of the external force and the internal force γ , which generates the spontaneous velocity. In Fig. 1, we show some trajectories of the centre of mass of the particle in real space. We have carried out numerical simulations of the time-evolution equations to obtain a dynamical phase diagram. Analytical study has also been developed to reproduce some of the bifurcations.



(3)

Fig. 1 Trajectories of the centre of mass of a deformable self-propelled particle under gravity in real space. Snap shot of the particle is also displayed for the sake of clarity.

- [1] T. Ohta and T. Ohkuma, Phys. Rev. Lett. 102, 154101 (2009).
- [2] M. Tarama, and T. Ohta, Eur. Phys. J. B 83, 391-400 (2011).

ダイヤモンドにおける励起子微細構造を利用した 冷却電子正孔系の実現

光物性研究室 挾間優治

Abstract We have studied photoluminescence spectra of free excitons in diamond under tunable excitation around excitonic phonon-sideband. We find that excitonic effective temperature is kept near the lattice temperature at excitation density upto 10^{19} cm⁻³. This result provides a novel excitation scheme to investigate quantum condensed phases in diamond. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

半導体の電子正孔多体系では、構成する粒子の有効質量が電子質量程度と小さいことに加えて、粒子間のクーロン相互作用が強力であるため、多様な量子凝縮相の存在が理論と実験の両面から調べられてきた。特にダイヤモンドにおいては、他の物質に比べて誘電率が小さく粒子間のクーロン力が増大するため、多体相関が顕著に表れることが知られている[1]。これまでに、バンド間遷移に対する2光子励起法を用いることで電子正孔系の低温化が実現され、多励起子状態などの観測が可能となった[2]。しかしながらこの手法では、励起密度の増加とともに侵入長が短くなり、電子正孔対の空間拡散の影響が避けられなくなる。

そこで本研究では、低温かつ高密度な電子正孔系を実現する励起手法として、励起子のフォノンサイ ドバンドにおける1光子励起法を検証した。この励起法では、侵入長は励起密度に依存しないことに加 えて、励起される電子正孔対の余剰エネルギーを格子の熱エネルギー程度に抑えることが可能である。 実験では、励起子のフォノンサイドバンド周辺の複数の励起光子エネルギーを選択し、各励起光子エネ ルギーにおける励起子の発光スペクトルを測定した。観測された励起子の発光ピークに対して、準熱平 衡を仮定してフィッティングを行うことで得られた励起子の有効温度の励起光子エネルギー依存性を

図1bに示す。ただし、格子温度は1.8K、 励起光強度は 1 µ J/pulse に固定した。こ の振る舞いを理解するために、励起子密度 の励起光子エネルギー依存性を計算した (図1a)。一般に高密度では、励起子が 熱エネルギーを放出して消滅するオージ ェ過程の効率が増大することが知られて おり、図1bの依存性は、このオージェ過 程による熱化の増減を反映したものであ ると考えられる。特に励起光子エネルギ -5.498eV においては、励起密度は 10¹⁹ cm⁻³、励起子の有効温度は 5.3K である ことが分かった。以上のことから、フォ ノンサイドバンドでの1光子励起法を用 いることで、電子正孔対の空間拡散の影 響を抑制できると同時に、高密度励起下 においても格子温度に数 K とせまる低温 化が可能であることが分かった。発表では、 励起子微細構造と今回の励起手法の関連 についても議論する。



Fig.1. (a) Electron-hole pair density calculated from absorption spectrum and (b) excitonic effective temperature at different excitation photon energies. TA-Ex and TO-Ex indicate phonon -assisted absorption edges for TA and TO phonons, respectively.

References

[1] R. Shimano et al., Phys. Rev. Lett., 88, 057404 (2002).

[2] 大間知潤子, 博士論文(東京大学) (2010).

高分子溶液のミクロ相分離: 擬二次元空間でのパターンダイナミクス

時空間秩序·生命物理研究室 林 仁志

Abstract. Time development on the micro-separated pattern in a polymer solution was investigated. Polymer solution in a thin slit is phase separating, coarsening, and finally pinned due to the gelation. We discuss the dependence of the coarsening law and the size of pinned structure function of the thickness of the slit. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

相分離はすべての混合系の構造形成において重要な役割を果たしており、実験、理論の両面から研究 が進められている。また近年、この相分離過程にゲル化過程が伴った系が盛んに研究されており、ゲル 化によって粘性・弾性が劇的に変化するために相分離のダイナミクスが変化したり、相分離の途中過程 で構造が凍結されたりするという現象が報告されている[1]。このとき、ゲル化相分離は空間的な制限 を与えた場合、空間サイズに対してどのように応答するだろうか。ゲル化を伴わない相分離においても、 空間的な制限が構造形成に大きく影響するということが分かっているが[2]、ゲル化相分離する系に関 しても、粘性・弾性の変化を伴うことにより、構造成長の過程に於いて特異的な空間依存性が見られる と期待できる。本研究では、高濃度の Poly(N-isopropylacrylamide)(PNIPAM)水溶液[3]をガラス基板 によってμメーターサイズで様々な厚さで挟んで、温度変化によってクエンチし、高分子溶液のゲル化 相分離に対する空間的な制限の効果を検証した。

図1はクエンチ後のそれぞれ異なる厚さの PNIPAM 水溶液を位相差顕微鏡で観察したものである。 どの厚さのサンプルにおいても、構造が成長していることがわかるが、厚さによってその様子に明らか な差異がある。そこでフーリエ変換によって波数分布を得て、そのピークの波数 k_p から構造の特徴的な 波長 λ (= $2\pi/k_p$)を求め、その時間変化を図2に示した。どの厚さにおいてもクエンチしてから初期にお いて、構造はスケーリング則 λ -tⁿに従い成長していくが、最終的には構造はゲル化過程によって凍結さ れていることが分かる。また、スケーリング指数 n、凍結時の構造の特徴的な波長はある一定の厚さ以 下では厚さに応じて単調に変化するという結果が得られた。本発表では、この成長則と凍結時における 構造の特徴的な波長の厚さ依存性について議論する。



Fig. 1. Pattern-evolution process observed with phase-contrast microscopy in PNIPAM aqueous solution at various thickness.

- [1] R. Bansil et al., Polymer 33, 2961 (1992).
- [2] H. Tanaka, Phys. Rev. Lett. 70, 2770 (1993).
- [3] F. Zeng et al., Polymer 39, 1249 (1998).



Fig. 2. Time development of characteristic wavelength λ . Structures coarsen with scaling law $\lambda \sim t^n$ (n is a function of the thickness h), and finally are pinned. Characteristic wavelength at pinned state is dependent on the thickness h. The dotted line shows the power law of $\lambda \sim t^{0.5}$, and the solid line show the power law of $\lambda \sim t^{0.2}$ for the guide of eyes.

p 型半導体 Ge:Ga のテラヘルツ非線形分光

光物性研究室 向井 佑

Abstract We report on the field ionization process of accepters in p-Ge under intense terahertz (THz) electric field. Broadening of the accepter absorption lines followed by disappearance is observed below 10 kV/cm. In the strong field limit, one can see clearly Drude dispersion. This implies that field ionization should take place within 1 ps under THz electric field. . © 2012 Department of Physics, Kyoto University

IV族半導体中のドナーやアクセプター準位は10 meV程度の束縛エネルギーをもつことから、テラヘル ツ周波数域における光伝導型検出素子等に利用されてきた[1]。テラヘルツ光照射による束縛キャリア のイオン化過程の評価は電導性の高速光制御等の面から非常に重要である。この周波数域における不純 物半導体の光伝導性の研究は非線形領域を含め数多く報告されているが、その多くは定常(cw)ーナノ秒 (ns)パルスレーザーを使ったものであり、より短い時間領域での光学応答に関する研究は未だ十分にな されてない[2~4]。

本研究ではピコ秒程度のパルス幅をもつ高強度テラヘルツ光電場下での不純物半導体内束縛キャリア のダイナミクスを探ることを目的とした。実験では高強度テラヘルツパルスの吸収スペクトルの強度依 存変化を調べ、テラヘルツ電場が誘起するキャリアの非線形応答を調べた。実験には厚さ500µm, Gaア クセプター密度〜10¹⁵/cm³のp型Ge半導体結晶を用いた。サンプル位置でのパルス強度はワイヤーグリッ ド偏光子ペアの回転により調整し、入射するテラヘルツパルスの電場成分は結晶の[100]方向に直線偏 光している。吸収スペクトルの入射電場強度依存性をFig.1 に示す。入射パルスの電場最大値が 1.6kV/cmの低強度極限では不純物準位間の光学遷移に対応する吸収ピークが見られるが、入射電場の最 大値が増加するにしたがい吸収ピークのブロードニング、それに続くピークの消失と低周波側での吸収

成分の増加が観測された。このようなスペクトルの変化 は半導体中束縛キャリアがテラヘルツ光照射により連続 帯へ励起された結果であると考えられる。低周波側にあ らわれる吸収は発生した自由キャリアによる光学応答と して理解できる。高強度極限では、Drudeモデルを使った フィッティングから見積もった自由キャリア数 (N_e=6.4 ±1.8×10¹⁴/cm³)がアクセプター密度と同程度であるた め、ほぼ全ての束縛キャリアがイオン化している。低温 Ge:Ga中の自由キャリアが不純物イオンとの再結合に要 する時間は数ns[2]と、テラヘルツパルスの入射間隔 1 msに比べ十分に短い。したがって図に示した吸収スペク トルの変化は1回のパルス照射の結果として生じたキャ リアの状態変化を反映していると考えられる。更に、200 ps程度の時間遅延をつけたテラヘルツポンプ-プローブ 測定を行い、高強度励起後の束縛キャリアの状態変化を 線形分光により評価した。線形スペクトルにおいても吸 収ピークの消失がみられたことから、束縛キャリアのイ オン化を裏付ける結果が得られた。



過去の研究ではこのようなイオン化過程は不純物-連 続準位間の共鳴吸収、あるいは非共鳴な低エネルギー光 子の多光子吸収により説明されてきた[3,4]。今回の実験

Fig. 1 Terahertz absorption spectra of p-Ge at 9K with different incident THz electric field.

条件では、テラヘルツ電場の誘起するトンネル電離過程により不純物キャリアのイオン化が定量的に説 明できることが明らかになった。

- [1] Rex L.JONES and P. Fisher, J. Phys. Chem. Solids 26,1125 (1965).
- [2] F. A. Hegmann, J. B. Williams, B. Cole, and M. S. Sherwin, Appl. Phys. Lett., 76, 3(2000)
- [3] M. Leung and H. D. Drew, Appl. Phys. Lett., 45, 6(1984)
- [4] Hui-Quam Nie and Coon D. D, Solid State Electron. 27, 53 (1984)

極低温イッテルビウム原子の超精密光会合分光と その重力逆二乗則の検証への応用

量子光学・レーザー分光学研究室 山田裕貴

Abstract We accurately determined the binding energies of electronic ground states of a Yb₂ molecule. These results enable us to test a Yukawa-type correction of gravity at a nanometer range. We also report on the determination of scattering lengths associated with Yb atom-molecule collisions. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

イッテルビウム(Yb)は最外殻に電子を二つもつアルカリ土類型の電子配置をしており、近年ボース・ アインシュタイン凝縮やフェルミ縮退が達成されるなど研究が進められている。Yb 原子の特徴として、 基底状態では電子スピンがゼロであるため超微細構造がなく2原子分子の断熱ポテンシャルは単一のポ テンシャルで表わされることが挙げられる。基底状態 Yb 原子からなる2原子分子の遠距離でのポテン シャルはこれまでの研究から、以下のようなレナード・ジョーンズ型ポテンシャルでよく表わされるこ とがわかっている[1]。

$$V(r) = \frac{C_{12}}{r^{12}} - \frac{C_6}{r^6} - \frac{C_8}{r^8}$$
(1)

ここで、*C*₆、*C*₈、*C*₁₂は同位体によらないパラメータで、数μKのYb原子集団に対する二光子光会合(2PA)を用いて測定したYb₂分子の束縛エネルギーから実験的に決定されている。

本研究では、より高精度に束縛エネルギーを決定するため量子縮退した Yb 原子集団に対して 2PA を 行った。これまで存在比が 0.13%と非常に小さいため測定されていなかった¹⁶⁸Yb を含む 3 種類のボース 同位体の計 9 つの束縛状態について半値全幅が 1 kHz 程度の分光に成功した(Fig. 1)。さらに、様々な 系統誤差の補正も行い束縛エネルギーを誤差 1 kHz 以下で決定した。また、束縛エネルギーの原子密度 依存性(Fig. 2)から Yb 原子と Yb₂分子間の散乱長も決定した。

我々は、この結果を用いて Yb₂分子の原子間距離であるナノメートルスケールでの重力逆二乗則の検 証が可能であると考えている。重力逆二乗則は重力ポテンシャルに湯川型の重力補正項

r/

$$-Gm_1m_2\alpha \frac{e^{-\gamma_\lambda}}{r} \tag{2}$$

を仮定して、ある距離スケールλでの補正項の大きさαの上限値を求める方法で様々な実験により検証 されている。これまでにナノメートルスケールでは、実験的に | α |<10²² という上限値が得られている[2]。

今回の測定結果を用いてこの重力補正項による振動準位の変化を評価することで、αに従来の上限値 を超える制限を加えられると考えている。



Fig. 2. Density dependence of binding energies.

Fig. 1. 2PA spectrum of ¹⁶⁸Yb. The solid line is a fit of the Lorentz function.

References

[2] V. V. Nesvizhevsky et al., Phys. Rev. D 77, 034020 (2008).

^[1] M. Kitagawa et al., Phys. Rev. A 77, 012719 (2008).

光格子中の Yb 原子の単一格子点観測及び操作に向けた開発

量子光学・レーザー分光学研究室 山本隆太

Abstract Towards observing and controlling the individual ytterbium atoms in an optical lattice, we design and develop a new system. In particular, we develop a new method for addressing the individual atoms, "light shift addressing".

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

近年レーザー冷却原子を周期ポテンシャル中にトラップすることが可能になった。この周期ポテンシャルは光格子と呼ばれており、物性物理で非常に重要なモデルである Hubbard モデルをよく表現する系として知られている。特に、冷却原子系では、原子数、温度、相互作用の強さなどを自由に変えることができるため、光格子を用いて実際の固体物理では実現が困難な系をシミュレーションすることが可能である。このことから物性物理の本質を解明することができると期待されている。特に注目すべき最近の進展として、光格子中にトラップされた原子を直接観測したことが挙げられる[1]。

本研究では、光格子中にトラップしたイッテルビウム(Yb)原子を直接観測するための実験装置を設計、 開発し、実際に高解像度のレンズを用いて直接観測を試みている。先行研究[1]で使用されたルビジウ ム(Rb)原子に対し、本研究で用いた Yb原子は豊富な安定同位体を持っているため、先行研究では実 現不可能なボゾンとフェルミオンが混合した系などを直接観測することが可能であると考えられ、この ような系の直接観測は今後の物性物理の研究において大いに意義があることであり、また非常に興味深 いことである。これまでに、ガラスセル中でボーズ・アインシュタイン凝縮体を生成し、さらに光格子 に導入することに成功している(Fig.1)。

一方で、光格子中の各格子点にトラップされた原子を個別に操作することは、量子シミュレーションや量子計算において非常に重要である。本研究では、理論提案[2]されている磁場勾配を用いる方法ではなく、非共鳴光の光強度分布の勾配によって生じる各格子点でのライトシフトの差と超狭線幅遷移である ${}^{1}S_{0} \rightarrow {}^{3}P_{2}$ 遷移を利用して各格子点の原子を個別操作する新しい試みを行った。実際に光強度に応じて共鳴線が大きくシフトすることを観測した(Fig. 2)。



以上に関する最新の状況を報告する。

Fig. 1. (a) Bose-Einstein Condensation in a thin glass cell, $\sim 3 \times 10^4$ atoms. (b) Diffraction pattern by a pulsed deep optical lattice, whose potential $\sim 250\text{Er} =$ 50uK. In both images, TOF (Time Of Flight) time is 14ms.



Fig. 2. Large energy shifts of resonance lines with an off-resonant laser beam. A circle symbol: the resonance line without an off-resonant laser beam. A triangle symbol: an off-resonant laser beam power is 1.97mW, and the resonance line is shifted ~0.27MHz. A square symbol: an off-resonant laser beam power is 8.40mW, and the resonance line is shifted ~1.45MHz.

References

[2] K. Shibata et al., Appl. Phys. B Laser Optics 97, 753 (2009)

^[1] C. Weitenberg et al., Nature 471, 319 (2011)

ショ糖単結晶における分子間振動モード

光物性研究室 足立 安比古

Abstract The anharmonic intermolecular vibration modes depending on temperature in sucrose are studied by terahertz time-domain spectroscopy. The result suggest exotic material control would be feasible with intense (2 MV/cm) terahertz pulse, which is currently achievable. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

光による分子や固体の状態制御は光化学反応や結晶構 造制御の観点から盛んに行われてきた。近年、高強度テ ラヘルツパルス電磁波を用いて大振幅の分子間振動を起 こすことで、分子結晶のかい離を観測しようとする試み がなされている[1]。しかし実際に熱を上げずに光だけで 結晶を融解したり、構造を変化させるといった現象の実 現までには至っておらず、より大振幅な分子間振動の励 起が求められる。本研究ではより効率の高い分子間振動 を実現するために必要な分子間振動モードの基礎光学特 性を明らかにした。

図 3 はテラヘルツ時間領域分光法を用いて測定したショ糖単結晶の複素誘電率の温度依存性である。1.4 THz と 1.9 THz 付近に 2 つの振動モードが観測されたが、それぞれ温度上昇とともにブルーシフト、レッドシフトしている。温度上昇に伴うブルーシフトは、多数の分子間の水素結合が関係する複雑な振動によるものであることが知られている[2]。一方 1.9THz の振動モードのレッドシフトは、単純な非調和ポテンシャル(図 2 の挿図)から説

明されることがあることが期待される。ここでは モースポテンシャルを仮定した。図 2 は 1.9THz のピーク値の温度依存性とシミュレーションで ある。ポピュレーションとしてボルツマン分布を 仮定すると、低温では基底状態からの第一励起の みが観測されていると考えられる。誘電率より求 まる吸収係数から、振動子強度が 0.012 と求まる。 温度を上げると複数の準位が熱励起され、選択則 $\Delta v = \pm 1$ を満たす励起・発光が観測されるよう になる。ポテンシャルの非調和性から図 2 の挿図 のように上準位に行くほど準位間隔が狭くなり、 低周波シフトが起きてくる。吸収スペクトルのシ ミュレーションと実験との比較から非調和ポテ ンシャルの形状を決定することができ、非調和パ ラメータ χ =0.001 と求まった。この結果より、高





Dots line is fitting curve.



強度テラヘルツパルス電磁波(2MV/cm)を照射した場合に、励起がカスケード的に起きることがシミュレ ーションから予測された。

References

[1]M. Jewariya, M. Nagai, and K. Tanaka, Physical Review Letters 105, 203003 (2010).[2]M. Walther, B. M. Fischer and P. U. Jepsen, Chemical Physics 288, 261 (2003).

ー軸性圧力印加による モット絶縁体 Ca₂RuO₄の電子状態の制御

固体量子物性研究室 石川 諒

Abstract We have investigated uniaxial pressure effects on the antiferromagnetic Mott insulator Ca_2RuO_4 . The crystal structure is known to be a crucial parameter to determine the electronic state in this system. In this study, we obtained evidence that a ferromagnetic metallic state is induced under in-plane uniaxial pressure. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

反強磁性モット絶縁体Ca₂RuO₄はRuO₆八面体格子を含む層状ペロブスカイト構造を持ち、スピン三重 項超伝導体Sr₂RuO₄とほぼ同じ結晶構造を持つ。Ca₂RuO₄においてはRuO₆八面体格子は傾斜と回転をして いることに加えて*c*軸方向に沿って顕著に収縮している。この物質では絶縁体-金属転移がCaのSrでの元 素置換[1]、電場印加[2]、静水圧印加(0.5 GPa)[3]などの手段で誘起されるが、いずれの絶縁体-金属転移 もRuO₆八面体格子の*c*軸に沿った収縮の解消を伴う。また静水圧印加で、基底状態は絶縁体から強磁性 金属を経て超伝導[4]へと移り変わるが、強磁性相が隣接することから、このCa₂RuO₄の圧力誘起超伝導 もスピン三重項であると期待できる。

しかしながら結晶構造の制御という観点からは、静水圧では任 意の方向の結晶軸を伸ばしたり、縮めたりすることは困難である。 加えて超伝導の誘起という観点からも、かなり高い静水圧が必要 (9 GPa)で物性測定手段に制約が多い。そこで我々は一般的に技術 の完成度は低いものの、結晶構造の制御に効果的な一軸性圧力(一 軸圧)に着目した。例えばc軸に沿った収縮を解消するには、等方 的な静水圧よりも面内一軸圧を印加したほうがより効果的なはず である。つまり一軸圧が格子歪み解消の方向に働けば基底状態の 劇的な変化が期待でき、静水圧より低圧で強磁性金属相、さらに は超伝導相を誘起できる期待も持てる。また静水圧では実現しな い新しい状態を誘起できる可能性もある。

本研究では一軸圧下での300 mKまでの低温測定を、従来から可 能だった交流磁化率測定に加えて新たに擬似四端子法を用いた電 気抵抗測定によっても可能とすることに成功した。また非常に脆 いCa₂RuO₄の単結晶を破壊することなく一軸圧を印加するため、 試料の側面をスタイキャストで覆うことで圧力の一軸性を保った まま印加可能圧力を上昇させることにも成功した。そしてそれら の新たな測定技術を用いて、Ca₂RuO₄の単結晶(広島大学から提供) における(1)c軸方向一軸圧効果、(2)ab面内一軸圧効果、さらには (3)面内一軸圧効果の面内異方性([100]と[110]方向の比較)らを調 べた。その結果、面内一軸圧下で室温での絶縁体金属転移の観測 (Fig. 1)、強磁性金属相の誘起(Fig. 2)、超伝導相の兆候の発見など に成功した。一方、期待された通りc軸方向一軸圧下ではこれらの 相転移は実現しなかったが、昇圧に伴って絶縁体ギャップが減少 することが分かった。

References

- [1] S. Nakatsuji and Y. Maeno, Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 2666.
- [2] F. Nakamura et al., JPS 2009 Autumn Meeting, 25aRK-9.
- [3] F. Nakamura et al., Phys. Rev. B 65, 220402(R) (2002).
- [4] P. Alireza et al., J. Phys.: Condens. Matter 22, 052202 (2010).



Fig. 1. Uniaxial-pressure dependence of quasi-four-wire resistance of Ca₂RuO₄. A sharp drop at 1.5 GPa reflects the insulator to metal transition. Note that the resistance contains the contact resistance between the sample and the pressure-cell piston.



Fig. 2. Temperature dependence of quasi-four-wire resistance of Ca_2RuO_4 at various magnetic fields. The suppression at 12 K and its field dependence are consistent with ferromagnetic ordering.

SiGe 混晶量子ドットにおける高密度キャリアダイナミクス

ナノ構造光物性研究室 上田 慧

Abstract Carrier dynamics of highly photoexcited $Si_{1-x}Ge_x$ quantum dots was studied using femtosecond pump-probe spectroscopy. We clarified that the initial decay time is explained well by quantized Auger recombination. The temperature dependence of the Auger recombination rate indicates that no-phonon transition due to quantum confinement effect is dominant in $Si_{1-x}Ge_x$ quantum dots. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

半導体量子ドットは、キャリアの運動を数 nm 程度の空間に閉じ込める 0 次元的な量子構造である。 キャリア間平均距離の減少や実効誘電率の低下から、半導体量子ドット内に閉じ込めを受けたキャリア 間には強いクーロン相互作用が働く。この強い相互作用により、三体のキャリア衝突による非輻射再結 合であるオージェ再結合が量子ドットにおいてはバルク結晶より高効率化される [1,2]。間接遷移型半

導体量子ドットにおいては、量子閉じ込めにより期待され る非フォノン遷移や量子化オージェ再結合特有の緩和プロ セスなどがキャリア緩和にどのような影響を与えるか解明 されていない。そこで本研究では、間接遷移型半導体量子 ドットにおけるオージェ再結合メカニズムの理解を目的と して、Si_{1-x}Ge_x混晶量子ドットにおける高密度光励起された キャリアのダイナミクスについて調べた。

試料には共スパッタリング法によって作製された直径 4 nm 程度の Si_{1-x}Ge_x 量子ドット(Ge 組成:x=0, 0.05, 0.10, 0.15)を用いた。Fig. 1(a)は、ポンプ・プローブ過渡吸収分 光法(励起光エネルギーEpump=2.34 eV、プローブ光エネルギ -*E*_{probe}=0.83 eV)によって得られた Si_{1-x}Ge_x 量子ドット(x=0) の過渡吸収減衰曲線の励起光強度依存性を示す。全ての試 料において励起光強度の上昇により、オージェ再結合を示 唆する非指数関数的な速い減衰成分が現れた。Fig. 1(b)は、 強励起と弱励起極限の減衰曲線の差分 Δ(-ΔT/T)をフィッテ ィングすることにより得た初期減衰時間の平均励起キャリ ア数依存性を示す。初期減衰時間は、破線で示す量子化オ ージェ再結合モデル[3]によって再現でき、xの増加に伴い オージェ再結合効率は増加することが分かった。さらに、 バルク結晶におけるフォノン介在のオージェ再結合とは異 なり、Sil,Ger 量子ドットのオージェ再結合効率は温度に依 存しなかった。以上の結果は、量子閉じ込めによる波数保 存則の緩和により Si1-xGex 量子ドットにおける量子化オー ジェ再結合にフォノンが介在しないことを示唆する。試料 は、神戸大の藤井教授グループより提供された。



Fig. 1 (a) Excitation intensity dependence of the transient absorption decay profile in $Si_{1-x}Ge_x$ nanocrystals (x=0). (b) Initial decay time as a function of the average e-h pair number in nanocrystals. Broken curves show calculated results by the quantized Auger recombination model.

References

[1] V. I. Klimov, A. A. Mikhailovsky, D. W. McBranch, C. A. Leatherdale, and M. G. Bawendi, Science **287**, 1011 (2000).

[2] I. Robel, R. Gresback, U. Kortshagen, R. D. Schaller, and V. I. Klimov, Phys. Rev. Lett. 102, 177404 (2009).
[3] A. Ueda, T. Tayagaki, and Y. Kanemitsu, J. Phys. Soc. Jpn. 78, 083706 (2009).

ディラック電子と通常電子が共存する場合の輸送現象

物性基礎論:凝縮系物理 江口 渡

Abstract We studied the interlayer magetoresistance in the quasi two dimensional organic conductor θ – (BEDT–TTF) $_2I_3$ assuming that both dirac cone and normal electron quadratic band structure exist near the Fermi surface .

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

グラフェン、擬二次元有機導体やトポロジカル絶縁体のエッジ状態などの2次元系では、フェルミ面 付近のエネルギー分散が運動量の1次に比例する分散を持つことが知られており、その有効ハミルトニ アンが質量ゼロのディラック方程式で記述できることからディラック電子系、その分散をディラックコ ーンと呼ぶ。

通常の2次元電子系では磁場をかけると電子のエネルギー準位は等間隔のランダウ準位に量子化する。一方ディラック電子系では磁場に対しエネルギーが磁場 *B、n*を整数として

$$E_n \propto \sqrt{B|n|}$$

に量子化し r=0 のゼロモードが現れる。このようなエネルギー準位の違いが低温における伝導率の振る 舞いに大きな違いを与える。

本発表では特に擬二次元有機導体である (BEDT-TTF)₂I₃ 系に関し発表を行う。(BEDT-TTF)₂I₃ は BEDT-TTF 分子の導体層と I₃ の絶縁層が交互に積み重なった構造を持ち、面間はトンネル効果による伝 導を持つ。 α -(BEDT-TTF)₂I₃ は高圧下でディラック電子系になり、面間磁気抵抗率の磁場に対する角度 依存性の実験結果が、ディラック電子のゼロモードを考えることで理論的に説明された[1]。一方 BEDT-TTF 分子の配向が異なる構造を持つ θ -(BEDT-TTF)₂I₃に関してはディラック電子のみで実験結果を 説明することができず、これはフェルミ面付近にディラックコーンと通常のバンド分散が共存するため だと考えられている[2]。

本研究ではディラック電子と通常の運動量の2次に比例するバンド分散を持つ電子をともに考える ことにより、θ-(BEDT-TTF)₂I₃の面間磁気抵抗の再現を試みた。また同時に計算した面内伝導率や、通 常の電子とディラック電子が混成した場合[3]の面内伝導率についても議論する。



Fig.1. A schematic picture of the band structure of $\theta - (BEDT-TTF)_2I_3$

- [1] T. Osada: J.Phys.Soc.Jpn. 77 (2008) 084711.
- [2] 田嶋尚也 他:日本物理学会 2010 秋,25aRB-1.
- [3] A. A. Taskin and Yoichi Ando: arXiv:1103.3096v2.



Fig.2. The angular dependence of the interlayer magnetoresistance for different magnetic fields. The horizontal axis θ is the azimuthal angle of the applied magnetic field. The longitudinal axis is normalized by the $\theta = 0$ value.

磁場侵入長測定による異方的ギャップ構造を持つ 鉄系超伝導体 BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂の研究

固体電子物性研究室 勝股亮

Abstract We have performed measurements of magnetic penetration depth λ in high- T_c ironpnictide BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ for 0.27 $\leq x \leq 0.64$. The temperature dependence of λ shows a *T*-linear behavior for all *x*, indicating that the line nodes in the gap are robust in this system. The anomalous enhancement of $\lambda(0)$ at $x \sim 0.30$ suggests the existence of a quantum critical point deep inside the superconducting dome.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

2008年に発見された鉄系超伝導体は高い転移温度(T_o)をもち注 目を集めているが、その超伝導対称性については未だに決定され ていない。多くの鉄系超伝導体はすべてのフェルミ面上で超伝導 ギャップが有限の値を持つフルギャップ超伝導であることが報 告されているが、BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂のx = 0.33では超伝導ギャップが ゼロ点(ラインノード)を持つことが報告されている[1]。従ってギ ャップ構造が置換量xに対してどのように変化するのかを系統的 に研究することは、ペアリング機構を明らかにする上で極めて重 要である。BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂では x = 0 での反強磁性秩序(T_N = 135 K)がP置換によって抑制され、x = 0.30 にて最大の T_c = 30 K の超 伝導が誘起される[2]。またこの置換域の常伝導相では、輸送特性 などで非フェルミ流体的な振る舞いが報告されており、量子臨界 点の存在が示唆されている[2]。

今回我々は幅広い x (0.27 $\leq x \leq 0.64$)に対し磁場侵入長測定を 行った。この実験手法では低エネルギーの準粒子励起を直接観 測することが可能であり、その温度依存性から超伝導ギャップ におけるラインノードの有無を調べることが可能である。その 結果全てのxにおいて磁場侵入長 λ が低温で温度に比例する依存 性を示し、ギャップ関数にラインノードが存在することを明ら かにした(図1)。また磁場侵入長の温度依存性の低温($T \leq 0.15T_{c}$) での傾きのx依存性をみると、x = 0.30を除き λ (T)の傾きはxに依存 せずほぼ一定である。この結果は、バンド計算から明らかにさ れている全置換域でフェルミ面の形状を変えないX点の電子面に、 ラインノードが存在することを示唆している。これは熱伝導率磁 場角度回転[3]や比熱[4]、ARPES[5]の結果からも支持される。



Fig. 1. Changes in λ for BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ with different P concentrations x as a function of T / T_c .



Fig. 2. Doping evolution of $\lambda^2(0)$ determined by three different methods.

また、図2はマイクロ波表面インピーダンス測定およびアルミニウム蒸着法により決定したλ(0)とλ(T) の低温での傾き各々のx依存性を示したものである。T_cが最大となるx~0.30において共に鋭いピーク構 造を示していることがわかる。これは有効質量m^{*}の増大を示しており、x~0.30に量子臨界点が存在する ことを強く示唆している。このように超伝導相内部において実験的に量子臨界点を観測した例はこれま でになく、この結果は2つの異なる超伝導相が存在することを示唆している。

References

[1] K. Hashimoto *et al.*, Phys. Rev. B **81**, 220501(R) (2010). [2] S. Kasahara *et al.*, Phys. Rev. B **81**, 184519 (2010).

[3] M. Yamashita *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 067507(R) (2011). [4] Y. Wang *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 184524 (2011).
[5] T. Shimojima *et al.*, Science **332**, 564 (2011).

有限量子系の熱伝導の線形応答

非平衡物理学研究室 紙谷典和

Abstract We study heat conduction through the quantum spin chain in the linear regime. Kubo formula is derived for some finite open quantum systems in contact with heat baths. We also argue that the Rotating Wave Approximation (RWA) is inadequate for the problem.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

熱伝導率を平衡系のカレントの自己相関関数で表す久保公式は、通常、熱力学極限の系に対して適用 される。多くの場合、自己相関関数は閉じた系のダイナミクスを用いて計算されるが、有限系に対して はこのような取り扱いは正当化されない。これに対し、熱浴のダイナミクスを取り入れた、有限開放系 の熱伝導に対する久保公式が、古典系の場合に A. Kundu らによって提案されている[1]。彼らの方法は、 相空間における定常分布関数の一次の摂動を境界のカレントを用いて表すことで、通常要求される局所 平衡の仮定を用いずに、開放系の久保公式を導くことが可能である。

一方、量子系での熱浴の効果は、Redfield モデルや局所的な Lindblad operator を用いたモデルで記述されることが多いが、多くの研究は一次摂動の数値計算にとどまっている[2][3]。そこで我々は、このようなモデルについて、Kundu らが古典系で行ったのと同様の議論が可能かどうかを検討した。具体的な系としては、スピン 1/2 の 1 次元鎖を考えた。

古典系の方法[1]と同様に、境界の熱流に注目する。この境界のカレントは、Schrödinger 表示から Heisenberg 表示に移るときと同様に、リュービリアンの作用を、密度行列に対するものから観測量に対 するものへ読み替えることによって定義される。すなわち、Aを時間によらない観測量、ρを密度行列、 L_sを密度行列へのリュービリアンとするとき、Aに作用する演算子L_Hを

$$\operatorname{Tr}[A(L_{S}\rho)] = \operatorname{Tr}[(L_{H}A)\rho]$$

によって定義する。*L_Hを*用いて境界のカレントが定義され、これは熱浴の種類によって異なる。密度行列の一次の摂動が、このような境界のカレントと平衡分布の積の形に書けるとき、古典系と同様の議論により、伝導率がカレントゆらぎによって表される。我々は、Redfield 熱浴と Local Operator Lindblad (LOL) 熱浴について、境界のカレントを計算した。それぞれ散逸部が次式で表されるものをいう。

$$\begin{split} D\rho &= \pi \sum_{i,j} \Gamma(\beta, \omega_{ij}) [X_{ij} | i \rangle \langle j | \rho, X] + h. c. & \text{Redfield 热浴} \\ D\rho &= \Gamma_{\!\!+}(\beta) \left(\sigma^+ \rho \sigma^- - \frac{1}{2} \{ \sigma^- \sigma^+, \rho \} \right) + \Gamma_{\!\!-}(\beta) \left(\sigma^- \rho \sigma^+ \frac{1}{2} \{ \sigma^+ \sigma^-, \rho \} \right) & \text{LOL 热浴} \end{split}$$

ただし、 β は逆温度、 $|i\rangle$ は固有値 ε_i のエネルギー固有状態、Xは熱浴とカップルする系の物理量、 $X_{ij} = \langle i|X|j\rangle, \omega_{ij} = \varepsilon_i - \varepsilon_j, \sigma^+, \sigma^-$ はスピンの昇降演算子、 $\Gamma(\beta, \omega_{ij}), \Gamma_+(\beta), \Gamma_-(\beta)$ などは熱浴の性質を表 すパラメータで、それぞれ、KMS条件: $\Gamma(\beta, \omega_{ij}) = \exp(-\beta\omega_{ij})\Gamma(\beta, -\omega_{ij})$ 、シングルスピン系($H = h\sigma^z$) に対する KMS条件: $\Gamma_+(\beta) = \exp(-2\beta h)\Gamma_-(\beta)$ を満たすものとする。、局所的な Lindblad operator に よる散逸は、スピン系の内部の結合が弱い場合、近似的に熱浴とみなすことができる。XXZ などのスピ ン保存系では、このような熱浴モデルに対して、熱伝導率 κ をカレントゆらぎを用いて次のように表す ことができることがわかった。

$$\kappa = \frac{1}{(N-1)k_BT^2} \int_0^\infty dt \langle J(t)J(0)\rangle$$

また、Redfield モデルからさらに回転波近似(RWA)を行うと、系の対称性により密度行列の摂動部 がゼロとなり、モデルとして不適切になることが示せた。

- [2] M. Michel, J. Gemmer, and G. Mahler, Eur. Phys. J. B 42, 555-559 (2004)
- [3] J. Wu and M. Berciu, EPL, 92, 30003 (2010)

^[1] A. Kundu, A. Dhar and O. Narayan, J. Stat. Mech. (2009) L03001.

UCoAI における臨界終点近傍の磁気励起の研究

固体量子物性研究室 軽部 皓介

Abstract The critical phenomena of metamagnetic transition in UCoAl were investigated with ²⁷Al-NMR measurement. Magnetization M_c and magnetic fluctuation S_c along the *c*-axis were estimated as a function of *c*-axis magnetic field H_c and temperature *T*. The results were compared with those in gas-liquid transition. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

UCoAlは、図1のような結晶構造を持ち、c軸方向に1T程度の磁場を掛けることによって、磁化に 不連続な跳びが見られるメタ磁性転移を起こす[1]。このメタ磁性転移は常磁性(PM)から強磁性(FM)への 1次相転移であるが、約12Kでこの1次相転移線は臨界終点(CEP)を持ち、臨界終点より高温では常磁 性と強磁性が連続的に繋がる領域になる。

このメタ磁性転移は、磁化を分子数密度、磁場を圧力にそれぞれ対応させると、気体-液体転移と非常 によく似ている(図 2)。実際、気体-液体転移は 3 次元 Ising 強磁性体モデルで理解できることが知られて おり[2]、メタ磁性転移の臨界現象は、見た目だけでなく物理的本質も気体-液体転移と同じであると期 待できる。気体-液体転移の臨界現象は古くから研究されており、臨界現象に伴う密度ゆらぎの増大など が定量的に調べられているが[3]、メタ磁性転移の臨界現象についての定量的な実験はこれまでにほとん ど報告されていなかった。

本研究では UCoAl のメタ磁性転移における臨界現象の静的、動的性質を定量的に調べるために、 UCoAl 単結晶を用いて²⁷Al 核の NMR を行い、c 軸方向の磁場 H_c と温度 T を制御しながら、ナイトシフト K と核格子緩和率 $1/T_1$ を測定することで、臨界終点近傍の c 軸方向の磁化 M_c および c 軸方向の磁気 ゆらぎ S_c を見積もった。 M_c から UCoAl のメタ磁性転移の(H_c ,T)相図を作成し、相図上で S_c をプロット すると、図 3 のような、磁気ゆらぎが臨界終点で発散する結果を得た。更に、臨界指数を計算すると気体-液体転移と同様の 3 次元 Ising ユニバーサリティクラスに属する結果となった。ただし、常磁性領 域に観測された磁化と磁気ゆらぎのピークは、気体-液体転移には見られない、遍歴メタ磁性体特有の 現象と考えられる。



Fig. 1. The crystal structure of UCoAl



Fig. 3. Magnetic fluctuation S_c on (H_c,T) phase diagram of UCoAl



Fig. 2. (a) Field-Temperature phase diagram of metamagnetic transition

(b) Pressure-Temperature phase diagram of gas-liquid transition

- [1] N. V. Mushinikov *et al.*, PRB **59**, 6877(1999).
- [2] T. D. Lee et al., PR 87, 410 (1952).
- [3] K. Nishimura *et al.*, J. Phys. Chem. **100**, 418 (1996).

スメクチック液晶層間のヘテロな高分子化と C-director ダイナミクス

ソフトマター物理学研究室 川本道久

Abstract. It was successful to photo-polymerize micro segregated liquid layer in-between smectic layers using immiscibility of acrylates with liquid crystals. We found that this heterogeneous polymer sheets memorize C-director orientation and keep the same electric field response as before the polymerization. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

(反)強誘電性スメクチック液晶は、カイラル対称性の破れに誘起される自発分極の発現[1]と、表面安定化状態と呼ばれる表示機構の考案[2]により、ネマティック液晶の応答速度より3桁ほども高速化する夢の液晶表示原理として30年ほど前に発案された。しかしながら、水平配向の表示素子内の配向欠陥の問題が本質的に改善されず、大型ディスプレイとしては撤退を余儀なくされている。本研究では、液晶構造内を局所的に高分子化・凍結することにより、液晶構造の安定化と電場応答性の保持を同時に実現した高分子安定化ブルー相[3]の原理と、スメクチック液晶の層間に溶媒分子が自発的に凝集する性質を見出した、膨潤スメクチック液晶[4]の概念を組み合わせ、スメクチック層間のみのヘテロな高分子化と、(反)強誘電性液晶のC-directorの均一配向制御を初めて実現した。層間のみの高分子化では、電場応答性も同時に保持されており、新しい高速液晶表示原理の実現の可能性が開けた。試料として、反強誘電性液晶 MHPOBC97%(重量比)、モノアクリル dodecylacrylate1.5%、ジアクリル 1,6-bis(acryloyloxy)hexane1.5%、重合開始剤 DMPAP0.1%以下の混合物を使用した。

Fig. 1 が液晶単体、混合試料の重合前、重合後における層間隔の温度依存性で、重合前では膨潤率がモノマー混合率 3%とほぼ等しく、溶媒が層間の一次元的に局在している事が分かる。重合後、溶媒の占有体積が減少し層間隔も縮んでいるが、組織に大きな変化がないことから、重合が層間で局所的に起こっている事と考えられる。

Fig. 2 に櫛歯電極セル(極板間距離 15µm)を用いた垂直配向の偏光顕微鏡観察結果を示す。図の暗いストラ イプパターンは櫛歯電極で、ストライプに垂直方向に電場が印加できる。図の十字線は偏光子の向きを表し、矢 印は各状態における層法線方向からの分子の傾き方向(C-director)を表わす。反強誘電性液晶相 SmC_A*相は 電場無印加時では螺旋構造を持ち、螺旋軸方向から見た場合 C-director が等方的に分布するため光が透過し ない。混合試料でのその状態が Fig. 2(a)で、暗状態として観察される。これに強誘電相転移閾値電場 E_{th}より弱 い電場を印加すると、反強誘電状態において常誘電的な誘電異方性による応答から、C-director は螺旋構造を 保ったまま歪んで電場方向に向き、光学的異方性を生じて光が透過する。この状態で重合を行い、電場を切っ た様子が Fig. 2(b)で、電場を切っても Fig. 2(a)の状態に戻らず、重合時の液晶配向が保たれている事が分かる。 重合後、E_{th}より大きい電場を印加した状態が Fig. 2(c)で、自発分極と電場の相互作用により強誘電状態に相転 移し、C-director が電場と垂直に配向する。以上のことから、重合後も重合前と同様に電場応答性を保つ事を示 しており、系全体ではなくスメクチック液晶層間のみが局所的に高分子化されたことを示すとともに、液晶分子の 運動性を凍結せずに配向のメモリ性を達成できたことがわかる。重合前後の応答特性などに関しても報告する。



Fig. 1. Temperature dependence of layer spacing

References [1] R.B.Meyer *et al.*, *J.Phys.* (Paris) **36**, L69 (1975).

- [2] N.A.Clark and J.P. Lagerwall., Mol. Cryst. Liq. Cryst., 94 (1983).
- [3] H Kikuchi et al., Nature Materials 1, 64 68 (2002).
- [4] J Yamamoto., Yokoyama Nano-structured Liq.Cryst Project Research Report 2, (2004)

非弾性 X 線散乱による液体 Rb のプラズモン測定

不規則系物理学研究室 木村耕治

Abstract We measured the inelastic X-ray scattering from the solid and the liquid Rb to determine their plasmon dispersions. For the large momentum transfers, the higher excitation energies were observed in the liquid than in the solid. This difference is interpreted as the reduction in the band structure effect upon melting.

© 2011 Department of Physics, Kyoto University

アルカリ金属は、ほぼ球形のフェルミ面を有し、その挙動は電子ガスモデルで良く記述される。電子 ガスモデルは、一様な背景正電荷の中で相互作用する電子集団であり、交換相関効果を明らかにする上 で、最も重要かつ基本的な系である。特に、電子密度の低化に伴い相互作用エネルギーが運動エネルギ ーに対して支配的になることから、低密度領域における挙動が盛んに研究されている。我々は、実験的 に低密度電子ガスの挙動を調べるため、アルカリ金属の液体状態に着目した。液体状態を利用すれば、 気液共存線を迂回するように温度と圧力を調整することで、電子密度を大幅に低下させることができる。 従って、アルカリ金属液体は、低密度電子ガスの振る舞いを実験的に解明する上で、理想的な系である。

金属中の伝導電子はプラズモンと呼ばれる集団的な励起モードを有する。プラズモンの挙動は電子間 相互作用を強く反映する。固体アルカリ金属のプラズモン分散は、電子エネルギー損失分光(EELS)に

より、求められている[1](図 1)。実験結果は、 r_s (電子の Wigner-Seitz 半径を Bohr 半径で規格化した値)が大きくなるにつれ分散が弱まる 傾向を示し、定性的には電子ガスモデルに基づいた理論[2](図 1 実線)と一致している。しかし、定量的な一致のためには非現実的 な r_s 値を設定しなければない。この相違の原因として、フェルミ準 位より上に位置する d状態の寄与(バンド構造効果)が指摘されて おり[3]、交換相関効果に関する正確な情報を得るには、バンド構造 効果の吟味が必要であることが示唆されている。

本研究では、高温高圧下における実験に先立ち、バンド構造効果 に関する知見を得るために、固体および融点近傍の液体 Rb に対して 非弾性 X 線散乱(IXS)測定を実施し、プラズモンの分散関係を求め た。測定は、SPring-8 の BL12XU において行った。

図2に固体・液体 Rb のプラズモン分散および IXS スペクトルの一つ(挿入図)を示す。スペクトルにはプラズモンのピークが観測される。固体・液体 Rb の分散関係を比較すると、qの大きい領域で液体 Rb の方が固体 Rb より大きな励起エネルギーを有している。この 差は、[3]で指摘されている、空の d 状態の寄与が、融解に伴い緩和したことによるものと推察される。

本研究により、Rb内のプラズモンに対するバンド構造効果の重要 性が、実験的立場から、より明瞭となった。同時に、融解に伴い、 バンド構造効果が緩和され、より電子ガスモデルに近づくことも明 らかになった。液体状態を利用することは、電子密度を希薄化する のに有効であるだけでなく、結晶状態において顕著なバンド構造効 果を減少させるという点からも、低密度電子ガスの実験研究にとっ て有利であることが示された。

References

[1] A. vom Felde et. al., Phys. Rev. B 40, 10181 (1989)

[2] K. S. Singwi et. al., Phys. Rev. 176, 589 (1968)

[3] F. Aryasetiawan et. al., Phys. Rev. Lett. 73, 1679 (1994)



Fig.1. Symbol: plasmon dispersions in solid alkali metals determined by EELS [1]. Solid line: theoretical prediction based on the electron gas model [2].



Fig. 2. Plasmon dispersions in solid and liquid Rb determined in this work. Inset: the spectrum of liquid Rb at q=0.18 Å⁻¹.

Diffusion of nuclear spin polarization in bilayer quantum Hall systems

Nano-scale Quantum Condensed Matter Physics Laboratory Nguyen Minh-Hai

Abstract At filling factor 2/3 quantum Hall states, nuclear spin polarization can be pumped by electric currents. Using a bilayer system, we have first observed the spatial diffusion of nuclear spin polarization from one layer to the other. The obtained diffusion coefficient agrees well with the value measured by optical method.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

With the prospect of applications to quantum computing, in recent years the dynamics of nuclear spins has attracted much attention owing to their long coherent time. At the spin phase transition point of the filling factor v=2/3 quantum Hall states, nuclear spins can be polarized by electric currents through hyperfine interaction. This enables us to investigate and control nuclear spins via electric means. However, due to the difficulty of locally polarizing and measuring nuclear spins, the diffusion of nuclear spin polarization (NSP) has not been spatially measured. Using a double two-dimensional electron system, we can observe the spatial transfer of NSP from one layer to the other.

Based on the linear relation of NSP and magneto-resistance pointed out by Hashimoto *et al.* [1], we investigate the dynamics of NSP by measuring the magneto-resistances. We use a double quantum well sample which consists of two 20nm thick GaAs layers separated by a 1.5nm thick AlAs barrier. A 6-tesla magnetic field is applied perpendicularly to the sample for tuning to the phase transition point of the v=2/3 quantum Hall states. One layer is kept at filling factor 2/3 quantum Hall state and the other layer is depleted. We introduce an electric current in the front layer to pump NSP and observe its diffusion to the back layer by measuring the time evolution of the magneto-resistances of the two layers.

Figure 1 shows the time evolution of the magneto-resistances after the introduction of the electric current of 20 nA in the front layer. The magneto-resistance of the front layer rises immediately (squares in Fig.1). However, the magneto-resistance of the back layer exhibits a delay of approximately 200 seconds and a lower rising speed

(open circles in Fig.1). This result is a clear evidence showing that NSP pumped in the front layer diffuses to the back layer.

We interpret the result as the combination of three processes: the pumping process of NSP in the front layer; the diffusion of NSP from the front to the back layer; the decrease of NSP due to impurities and spin-lattice relaxation. Using a simple one-dimensional diffusion model, we simulate the three processes of NSP. By fitting the experiment and simulation results (dashed lines in Fig.1), we estimate the diffusion coefficient to be approximately 15 nm²/s.

In conclusion, we have first observed the spatial diffusion of nuclear spin polarization in bilayer quantum Hall systems.



Fig.1. Time evolution of the magneto-resistances in the front (squares) and back (circles) layers. The dashed lines show simulation results.

[1] K. Hashimoto, K. Muraki, T. Saku and Y. Hirayama, Phys. Rev. Lett. 88.176601 (2002)

コアシェル型半導体ナノ量子ドット CdSe/ZnS の点滅現象

光物性研究室 楠田良介

Abstract Semiconducting quantum dots show light intermittency even under continuous laser excitation. We observed photoluminescence blinking behaviors of single quantum dots (CdSe/ZnS) on nearly-resonant and far non-resonant excitation conditions. The obtained blinking statistics shows that the nearly-resonant exaction condition enables the on-state duration to be longer than the non-resonant excitation case.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

コアシェル型半導体ナノ量子ドット CdSe/ZnS はその0次元的な性質から電子の準位が離散化され、 固体結晶でありながら原子のような孤立二準位系として振る舞うことが知られている。さらに直径 10nm 程度の量子ドット内部で励起された電子正孔対は、強いクーロン相互作用により励起子状態を形 成する。このような量子ドットを連続的に光励起するとその蛍光の振る舞いに、発光する状態と発光し ない状態を繰り返す点滅現象が起きる。そのオン寿命、オフ寿命のヒストグラムを取ると式(1)のよ うな指数則に従い、その指数 α の値は典型的に 1.5 に近い値を取ることが知られている[1]。

$$P = A\tau^{-\alpha} \tag{1}$$

この指数則はランダムなタイミングで発光が起こるとするような単純なレート方程式のみによって導出することは出来ず、点滅が起こる起源は未だ解明されていない。そこで本研究では、単一の量子ドッ

トをバンド幅よりも高いエネルギーのレーザーで非共鳴励起 した場合と、近共鳴励起した場合での点滅現象を観測し、その 振る舞いを比較することで、そのメカニズムの解明を試みた。

実験ではスピンコート法を用いて孤立分散させた量子ドットについて励起波長を 532nm と 633nm のそれぞれについて 光学測定を行った。用いた量子ドット QDOT655 は室温にお いて 655nm 中心の発光を示す。Fig.1(a)(b)に 532nm、633nm で同一の単一量子ドットを励起した際のオン寿命とオフ寿命 のヒストグラムをそれぞれ示す。その解析結果から、指数 α の 値が、532nm 励起の場合で $\alpha_{on} = 1.5$, $\alpha_{off} = 1.6$ 、633nm 励 起の場合、 $\alpha_{on} = 1.0$, $\alpha_{off} = 1.8$ と大きく変わっていることが わかり、非共鳴励起にくらべて近共鳴励起の場合のオン状態の 寿命が長くなることが観測された。

量子ドットの点滅のオン状態にある時は、連続的に励起され たキャリアが、発光状態まで緩和し、そこで励起子が再結合し て発光する。一方で、オフ状態においては励起されたキャリア がダーク準位にトラップされ、発光が起こらない。633nm で 励起した際にオン状態の寿命が532nm で励起したときに比べ て長くなることから、励起状態から発光状態へ緩和する際の余 剰エネルギーが、コア中のキャリアがダーク準位にトラップ される過程にフォノンを介して影響を与えていると考えられ る。



Fig.1 Normalized probability density of on and off time duration under 532nm (a) and 632nm (b) excitation

References

[1] P. Frantsuzov et al. Nature Physics, 4, 519-522(2008).

鉄系超伝導体 BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂の正方晶相における 回転対称の破れ

固体電子物性研究室 史 宏杰

Abstract We provided thermodynamic evidence for the existence of nematic phase transition in iron-pnictide superconductors. Magnetic torque and synchrotron X-ray diffraction measurements were performed over a wide doping range of $BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$ samples, which allowed us to determine the nematic phase transition points on the phase diagram. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

鉄系高温超伝導体のアンダードープ領域では、正方晶/斜方晶の構造相転移と反強磁性相への相転移 を示す。これらの構造/磁気相転移と関連して、正方晶相において電子系が結晶の4回対称性を破る Nematic 状態が指摘されており、スピン及び軌道の揺らぎ、あるいはそれらの秩序と超伝導がどのよう に相関しているかを明らかにすることは、この系の超伝導の起源を理解する上で極めて重要な問題とな る。

今回我々は鉄系高温超伝導体のなかでも純良な系である BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂単結晶[1]についてマイクロ カンチレバーを用いた磁気トルクの精密測定を行った。磁気トルクは磁化率の異方性を直接的に測定可 能な実験手法であり、Nematic 状態による回転対称性の破れの有無を観測する熱力学的プローブである [2]。実験は、広いドープ域の単結晶試料について、磁場を ab 面内で回転させ、その際の磁気トルク測 定を行った。その結果、アンダードープ領域において、構造相転移温度よりも数十 K 高温から、面内磁 化率の異方性を示すトルクの2 回対称成分の変化が観測された。この面内対称性の破れは、構造/磁気 相転移が消失したオーバードープ域の試料でも確認され、超伝導相を覆うように存在する。これは、正 方晶の対称性が破れた Nematic 状態が実現していることを示している。発表では、単結晶放射光 X 線の 実験結果を含め、この系の回転対称性の破れについて議論したい。



Fig. 1. Doping-temperature phase diagram of $BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$. Solid circles, open triangles and open squares are the antiferromagnetic transition T_N , T-O structural transition T_S , and superconducting transition temperatures T_C . Crosses indicate the nematic transition temperature T^* .

- [1] S. Kasahara et al., Phys. Rev. B 81, 184519 (2010).
- [2] R. Okazaki et al., Science 331, 439-442 (2011).

Hindered SmC 相に誘起される異常臨界現象

ソフトマター物理学研究室 鈴木大二朗

Abstract We investigated the relation between critical phenomena and three kinds of binary phase diagram by the measurement of the layer compression modulus and the electroclinic effect. We found out that only the system appearing an Induced SmA phase shows a large temperature width exhibiting a critical behavior.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

スメクティック A(SmA)相-スメクティック C(SmC)相転移では、SmA 相で液晶分子長軸が層に垂直に 配向している状態が、層内で傾くことにより SmC 相に転移する。多くの物質の SmA-SmC 相転移では、 SmC 相の秩序変数である傾き角 θ が、相転移点で0から連続的に有限の値に変化する2次相転移を示す。 このため、傾きに関わる復元力が相転移点で消失し、層の膨張・圧縮変形に関わる層圧縮弾性率 B は相 転移点に向かって十分高温の SmA 相から減少し始め、臨界ソフトニングが起こる。一方未知の液晶相 の同定には、既知の液晶相との混合による混和性試験が行われる。しかし SmC 相の場合、相手の液晶 化合物が SmC 相を示す場合でも、混和により SmC 相が不安定化し SmA 相が誘起される(Induced SmA) 例がいくつか報告されており、混和性試験が有効でない場合がある。本研究では、混和によって SmC 相が消失し Induced SmA 相が出現する限界濃度に近づくにつれ、臨界ソフトニングを示す温度域が広が っていく点に注目した。すなわち、この異常臨界現象は混合系での SmC 相が「hindered (隠された) SmC」相として内在的に存在していると考えた。そこで以下の3種類の典型的な混合系相図と臨界現象 の関係を研究した。3つの混合系とは、(A)双方ともに SmA 相と SmC 相を有するが、混合により SmC 相が消失し Induced SmA 相が現れる混合系(P10O10-10B)、(B)双方とも SmA 相と SmC 相を有し、混 合しても SmC 相が保持される混合系(MHPOBC-10B)、(C)混合物は SmA 相のみを有する混合系 (9OCB-10B)である。Fig1 にそれぞれの混合系における、層圧縮弾性率測定による SmA-SmC 相転移点 近傍での臨界ソフトニングの混合物濃度依存性、および各相図と SmA の温度幅で規格化した見積もら れた臨界領域の温度幅ATを挿入図として示した。



Fig 1 Temperature dependence of the layer compression modulus B in mixtures (A), (B) and (C) of various mixing ratio. Insets show phase diagram and temperature width ΔT exhibiting a critical behavior

behavior. P10010-10B の系(Fig.1(A))では臨界現象の起こる温度域が広がるのに 対し、MHPOBC-10B(Fig.1(B))と 9OCB-10B(Fig.1(C))の系では減少傾向 にある。つまり P10010-10B の系でみられる異常臨界現象、臨界温度域が 広がる事象は、Induced SmA 相を誘起する混合系に特有の現象と結論した。 この現象では、本来 SmC 相を復元すべき「hindered (隠された) SmC 相」 が重要な役割を担っていると考えられる。さらに電傾効果とよばれる、層

に平行な電場により誘導される分極ならびに層内分子の傾き θを、 P10010-10Bの混合系において測定した(Fig.2)。臨界温度領域の広 がりを反映した電傾係数の増大と温度依存性の低下がみられる。電傾効 果でのθの変化による電気光学応答は、強誘電性 SmC*相でのそれより も高速なため、液晶表示素子への応用も期待される。



トポロジカル超伝導接合 Pb/Ru/Sr₂RuO₄の磁場応答

固体量子物性研究室 鷲見拓哉

Abstract We fabricated superconducting junctions $Pb/Ru/Sr_2RuO_4$, which exhibit peculiar interference. Below the superconducting transition temperature of Sr_2RuO_4 , we observed anomalous magnetic field modulations of differential resistance, which are attributable to the formation of chiral domains characteristic of superconductivity with broken time reversal symmetry.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

Sr₂RuO₄[1]は、スピン三重項カイラル p 波超伝導体の最有力候補である.また、クーパー対の軌道角 運動量の整列による時間反転対称性の破れにより、従来の超伝導とは波動関数のトポロジーが異なるト ポロジカル超伝導体として注目されている.さらに Sr₂RuO₄-Ru 共晶系では、Sr₂RuO₄単体での超伝導転 移温度 $T_{c,SRO}$ =1.5 K より高い $T_{c,3-K}$ =3 K から超伝導が発生する.我々はこの共晶系の ab 面に s 波超伝導 体 Pb (T_c = 7.2 K)を蒸着した Pb/Ru/Sr₂RuO₄ 接合の研究で、臨界電流の温度依存性を調べたところ、 Sr₂RuO₄の T_c 近傍で臨界電流が急激に減少する異常な振る舞いを観測した[2].この振る舞いは、以下の 機構で説明できる.Pb の超伝導近接効果によって誘起された Ru の s 波超伝導位相の巻き付き数 (Winding Number)は N = 0 で、一方の Sr₂RuO₄ は $T_{c,SRO}$ 前後で位相の Winding Number N=0 から N=1 への転移が起 こると考えられる.共晶系では、Ru が Sr₂RuO₄ に取り囲まれているため、両者のトポロジーの不整合に よる効果が Josephson 電流の打ち消しとして現れる.以上から Pb/Ru/Sr₂RuO₄ 接合は、s 波超伝導体をト ポロジカル超伝導体が取り囲む形状の接合のために、非自明なトポロジーの効果が反映される「トポロ ジカル超伝導接合」といえる.

本研究では、共晶結晶の育成に取り組み Pb/Ru/Sr₂RuO₄接合素子を作製し、微分抵抗 dV/dIの磁場依存 性を測定すると、Fig.1 のような周期性のない異常な振る舞いが観測された. $T_{c,SRO}$ (=1.4 K)以上では磁場 に対して dV/dI が激しく振動する振る舞いであったが、 $T < T_{c,SRO}$ で磁場スイープを繰り返すと、dV/dI の 示すパターンに再現性が見られた.時間反転対称性の破れた超伝導体を特徴付けるカイラルドメインの 形成やカイラルドメインウォールの運動[3]が、この $T_{c,SRO}$ 以下での振る舞いに関与している可能性があ る.

さらに、dV/dIの温度依存性には、ゼロ磁場での臨界電流の温度依存性を反映する振る舞い(Fig.2(a))のほかに、磁場中ではそれと異なる振る舞い(Fig.2(b))も観測された.後者には、磁束の侵入が関与していると考えられる.



発表会では、本研究で得られた磁場依存性と温度依存性の結果とそれらに関する考察について述べる.

Fig. 1. Magnetic field modulations of the differential resistance of a Pb/Ru/Sr₂RuO₄ junction below $T_{c,SRO}$.



References

[2] T. Nakamura *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 060512(R) (2011); T. Nakamura, T. Sumi *et al.*, submitted to J. Phys. Soc. Jpn. (2011).

[3] F. Kidwingira et al., Science 314, 1267 (2006).

^[1] Y. Maeno et al., J. Phys. Soc. Jpn. 81, 011009 (2012).

希土類元素希釈系におけるスピンホール効果の研究

固体電子物性研究室 永田真己

Abstract It has been suggested that the spin Hall effect in nonmagnetic metal with rare-earth impurities can be huge. First we confirm the spin Hall signal in Pt by fabricating nanowire device structure. We successfully grow thin films of Ag with rare-earth Tm impurities, but could not observe the spin Hall effect.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

スピンホール効果とは常磁性体に電流を流したとき、それと垂直な方向に電子の角運動量の流れ(ス ピン流)が発生する現象である。伝導電子のスピンが金属のバンド構造や不純物にどのように影響され るのかという、磁性体研究の最先端の研究対象として、また既存のエレクトロニクスに電子スピンを応 用しようとするスピントロニクス分野における研究対象として、スピンホール効果の研究は盛んに行わ れている。現在までに、半導体や Pt などの純粋な金属においてスピンホール効果がおこることが見い だされているものの[1,2]、未だ研究の舞台は限られており、磁性不純物を含んだ系などの新しい舞台 での発展が期待されている。

2009 年、理論的研究により Ce(セリウム)や Yb (イッテルビウム) など不完全内殻に f 電子をもつ希 土類系金属を希釈に含む貴金属において、電流からスピン流への変換率が現在までに観測されているよ りも十倍程度大きい、巨大なスピンホール効果が予言された[3]。我々は、このような特異な系におい てスピンホール効果の研究を行うために、電子線リソグラ

フィを用いた微細加工プロセスの開発、非局所測定法を用いたスピンホール効果の測定に取り組んだ。

我々は、まず電子線リソグラフィによって面内スピンバル ブ素子を作製し、非局所測定法とロックインアンプを用い た微小信号測定を行うことによって、右図に示すようにス ピン蓄積信号を測定に成功した[Fig1]。これらの結果から、 Cuのスピン輸送特性を研究した。

その次の段階として、同様に電子線リソグラフィによっ てPtのスピンホール素子を作製した。その結果、スピンホー ル信号を得ることに成功し[Fig2]、これらの結果からPtのス ピンホール効果の特性について研究した。

次に、希土類希釈系材料を用いたスピンホール効果の研究 に取り組んだ。相性の良い希土類元素と貴金属の組み合わせ として Tm(ツリウム)と銀を見いだし、分子線ビームエピタキ シー装置を用い二つの金属を同時に蒸着することによって、 希土類希釈系細線を作成した。基板には MgO 基盤を用いるこ とにより、銀細線のエレクトロマイグレーション現象の問題 を改善した。しかし、スピンホール効果を観測することはで きなかった。その原因としては、微細加工の過程で銀細線の 表面状態が悪くなり、Cu 細線から銀細線への有効なスピン流 の注入が行えなかったことが考えられる。

References

- [1] T.Kimura et al., Phys. Rev. Lett. 98, 156601 (2007)
- [2] O.Mosendz et al., Phys. Rev. Lett.102, 046601(2010)
- [3] T.Tanaka and H.Kontani New J. Phys. 11, 013023(2009)



Fig1. Nonlocal spin-valve signature as a function of magnetic field. A: parallel; AP: antiparallel The right illustration is the measurement geometry.



Fig2. The change in Hall resistance due to the inverse spin Hall effect of Pt.

タンパク質分子改変による会合状態の制御と光散乱解析

生体分子構造 長谷川公寛

Abstract We examined the aggregation state of self-associating protein using Dynamic Light Scattering (DLS). In general DLS systems, molecules are assumed as spherical particles. We assumed them as non–spherical particles and simulated DLS results. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

近年、様々なタンパク質のX線結晶構造解析が進められてきた。結晶化にはタンパク質の精製が必要 となるが、これらの中には膜タンパク質や多量体タンパク質等、結晶化が困難なタンパク質が存在する。 これらのタンパク質が溶液中で不規則に会合して生じる凝集体や沈殿物が、結晶化を困難とする要因の 一つとなっている。本研究で扱ったタンパク質も溶液中で凝集性を示すタンパク質である。本タンパク 質は細胞内ミトコンドリア外膜に存在し、生体膜を通じてミトコンドリア内へ適切な物質の輸送を助け る膜輸送装置の一種である。現在膜輸送の機構解明が進められており、本タンパク質の会合状態の解析 はその手掛かりになると考えられている。

本研究では均質に会合する変異体の作成にむけて、飛行時間型質量分析によりタンパク質分子中の不 安定部位を同定し、PCR 法による遺伝子操作にてタンパク質分子改変を行った。作成したタンパク質分 子の会合状態、粒子径の分散性や粒子径時間変化を探る方法としては動的光散乱法(DLS)を利用した。

会合状態の制御においては、溶液中で分子が単量体と二量体等の多量体がそれぞれどの程度形成され ているかを知ることが重要である。例えば、ゲルろ過クロマトグラフィーによる分子量比の決定や、ま た、タンパク質分子の大きさの変化を解析する事によっても可能である。既存の DLS 測定では一般に 粒子を球状に仮定して解析が行われる。そこで本研究では、上記タンパク質について、より詳細な大き さに関する解析を行うために、球状あるいは非球状会合を仮定し[1,2]、DLS 測定を行い、理論の拡張と その解析を行った。

上記タンパク質についての DLS 測定結果を Fig.1.(a)に示した。ゲルろ過クロマトグラフィーの結果 と合わせて時間の変化と共に1量体から2量体が生成される過程が観測された。Fig.2.(b)には同体積で ある球状と非球状粒子を仮定した、DLS 測定のシミュレーション結果を示した。これらの結果を構造が 既知であるタンパク質の DLS 測定データと比較し、シミュレーションの結果とタンパク質2量体の形 状の解析について議論を行った。



Fig.1. (a)Time dependence of intensity correlation function of self-associating protein. (b)Intensity correlation function of spherical and prolate (axial ratio = 4) particle.

- [1] V.A Bloomfield, W.O Dalton and K.E Van Holde, Biopolymers. 5 135–148 (1967)
- [2] Cantor and Schimmel, BIOPHYSICAL CHEMISTRY Part II, 557-570 (1980)

CeCoIn₅の FFL0 相と反強磁性秩序の角度依存性

凝縮系理論グループ 細谷健一

Abstract We study angular dependence of the antiferromagnetic order in the high-field and lowtemperature (HFLT) SC phase observed in CeCoIn₅. We confirm that, when a magnetic field is applied along the basal plane, a Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) phase coexisting with an antiferromagnetic order appears, and, as the field is rotated out of the basal plane, the antiferromagnetic order disappears keeping the FFLO order intact. The latter disappears at a higher angle. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

重い電子系超伝導体 CeCoIn₅は、その超伝導相の高磁場かつ低温領域において、連続転移で隔てられ た通常の渦糸格子状態とは異なる超伝導相を有する物質である。この相は、超音波音速測定や不純物ド ープ実験の結果から、超伝導ギャップが空間変調した Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 状態が 実現したものであると考えられており[1]、最近の NMR 実験はこの描像の正当性を支持した[2]。一方、 伝導面 (ab 面) に対し平行に磁場を印加した場合に、伝導面に垂直な方向にモーメントを持つ反強磁性秩 序が、高磁場・低温 (HFLT) 超伝導相内に現れることが、中性子散乱実験[3] により明らかにされている。 そして、磁場の向きを ab 面から回転していくと、ab 面とのなす角θが 17°付近で反強磁性秩序が消失 することが、中性子散乱実験[4] により観測されている。このとき、モーメントの向きの容易軸(c 軸) 方向からのずれは観測されていない。この HFLT 相内で反強磁性秩序が現れる機構について多くの議論 がなされている。

以前に、パウリ常磁性対破壊の強い d 波超伝導体では、超伝導と反強磁性が共存しやすく、FFL0 の空間変調により反強磁性秩序との共存領域が劇的に拡大される事が示されている[5]。これを踏まえ、本研究では、 θ を変化させたときの反強磁性秩序と超伝導秩序の共存について調べた。ここでは、超伝導と共に反強磁性の平均場も考慮した BCS ハミルトニアンから導出した微視的な Ginzburg-Landau 自由エネルギーを用いて、パウリ常磁性対破壊効果と共に軌道対破壊効果も考慮して解析計算を行った。磁場が ab 面に平行な場合に広域で実現していた超伝導と反強磁性との共存相は、磁場と ab 面とのなす角 θ を増やすにつれてモーメントに平行な磁場成分の増加により不安定化する。このとき、FFL0 相自身も軌道対破壊効果が相対的に強まることにより不安定化するが、反強磁性秩序の不安定化が大きく、角 θ を増加してゆくと反強磁性秩序を持たない FFL0 相が残る角度領域が現れることが確認された(Fig. 1)。



Fig. 1. Example of numerically obtained H-T phase diagrams with (a) $\theta = 0^{\circ}$, (b) $\theta = 10^{\circ}$ and (c) $\theta = 15^{\circ}$.

- [1] H. Adachi and R. Ikeda, Phys. Rev. B 68, 184510 (2003).
- [2] K. Kumagai et al., Phys. Rev. Lett. 106, 137004 (2011).
- [3] M. Kenzelman, et. al, Science. 321, 1652 (2008).
- [4] E. Blackburn, et. al, Phys. Rev. Lett. 105, 187001 (2010).
- [5] Y. Hatakeyama and R. Ikeda, Phys. Rev. B 83, 224518 (2011).

2次元人工近藤格子における超強結合超伝導

固体電子物性研究室 水上雄太

Abstract 2D confinement of the heavy fermions is achieved by fabricating superlattices made of alternating layers of heavy-fermion CeCoIn₅ and conventional-metal YbCoIn₅.Superlattices exhibit an enhancement of the upper critical field relative to the transition temperature, indicating an extremely strong- coupled nature of the superconductivity.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

相互作用する電子は低次元の空間に閉じ込められるとその電子相関が増大し、通常金属状態における 振る舞いとは異なる物性を示すことがある。Ce や U を含む金属間化合物に代表される重い電子系にお いてはf電子と伝導電子との混成により自由電子の1000倍程度にもなる有効質量を持つ準粒子が形成さ れ、最も電子相関の強い金属状態が実現されている。重い電子系超伝導体 CeCoIns は重い電子系化合物 の中では最も2次元的な結晶構造を持つ物質の一つであるが、その反強磁性揺らぎの温度依存性[1]から 異方的3次元物質であると考えられている。このようにこれまでの重い電子系化合物の電子構造は基本 的に3次元的である。しかしながら重い電子系化合物と非磁性通常金属との人工超格子を作製すること により重い電子を2次元に閉じ込めることができ、そのような系において電子相関や磁気揺らぎの増大 が期待できる[2]。

我々は分子線エピタキシー法を用いてCeCoIn₅ ϵn 層、非磁性 通常金属のYbCoIn₅ $\epsilon 5$ 層交互に積層した人工超格子 CeCoIn₅(n)/YbCoIn₅(5)を作製した。ここで5層のYbCoIn₅は異な るCeCoIn₅層間のCe原子のRKKY相互作用を遮蔽するために十 分厚い。そこでYbCoIn₅の層数を5層に固定しCeCoIn₅の層数を $n=9,8, \cdot \cdot 1$ と少なくしていくことにより重い電子の次元性 を 3 次元から 2 次元へと制御した。Fig.1 は人工超格子 CeCoIn₅(1)/YbCoIn₅(5)の模式図である。

これらの試料で電気抵抗率測定を行ったところ、n≧3の試料 でゼロ抵抗を、n=2.1の試料で超伝導転移オンセットを確認し た。これによりCe原子が2次元正方格子を組む2次元近藤格子に おいても超伝導が現れることが明らかとなった。さらに電気抵 抗率測定により上部臨界磁場Hc2を決定したところ人工超格子 はバルクと比較して低い超伝導転移温度T_cを示すにもかかわ らずバルク同様の高いH_{c2}を持つことが明らかとなった。Fig.2 にバルクと人工超格子n=7,5,3における温度磁場相図を示す。こ こで低温におけるH_{c2}はパウリ常磁性効果により決定されてい るため $H_{c2}(0)/T_c$ は超伝導ギャップ $\Delta \ge T_c \ge O \ge 2 \Delta / k_B T_c$ に比例す る。バルク $CeCoIn_5$ は強結合超伝導体であり、その $2\Delta/k_BT_c$ の値 は6程度である[3]。このことから人工超格子 CeCoIn₅(5)/YbCoIn₅(5)において24 /k_BT_cの値は10を超えることが 見積もられる。この結果は人工超格子において強結合の性質が 更に増大した超伝導状態が実現されていることを示している [4]。



Y. Kawasaki *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 2308 (2003).
 W. K. Park *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 177001 (2008).



Fig. 1. CeCoIn₅(1)/YbCoIn₅(5) superlattice



Fig. 2. The upper critical field of superlattices

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

[4] Y. Mizukami et al., Nature Physics 7, 849 (2011).

ランダムヒューズ模型を用いた混合系の破壊強度の研究

非平衡物理学研究室 宫城俊吾

Abstract It has been reported experimentally and numerically that a composite of soft and hard materials sometimes increases fracture strength in comparison with a single one. We investigate its mechanism using the random fuse model which represents an electrical analogue of brittle fracture. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

硬い物質と柔らかい物質からなる混合物は、それら単一なものと比較して、破壊強度が大きくなる場合があることが経験的に知られている。例えば、脆性を示すセラミックは延性を示す金属を添加することで破壊強度が増大する。またダブルネットワークゲルは強電解質で脆性のゲルと中性で柔軟性のある ゲル二種類を組み合わせたもので、普通のゲルよりも高い強度を示す。

占部ら[1]は、混合物を弾性率の異なる二種類の線形バネからなる格子でモデル化し、それに初期き裂 を入れ、両サイドを一定の速さで引っ張るシミュレーションを行っている。二種類のバネには共通の応 力の閾値が設定されており、それを越えたボンドが順次切れていき、最終的に系が破断する。その論文 の中で、初期き裂がある程度長ければ混合物の強度が均一な物より増大するという結果を報告している。 しかし混合系のほうが破壊強度が増大する機構はよく分かっていない。

本研究ではランダムヒューズ模型を用いて同様のシミュレーションを行い、なぜ混合系は均一系より 強くなるのかについて調べた。ランダムヒューズ模型とは、力学的な破壊をその電気的な対応物でモデ ル化したものである。このモデルでは、フックの法則に従うバネはオームの法則に従うヒューズで表現 され、バネの破壊強度はヒューズが焼き切れる電流値で代替される。そして応力は電流と、ひずみは電 圧と、弾性率は伝導度と対応している。

数値シミュレーションの結果、ランダムヒューズ模型でも占部らの報告と同様に、均一系よりも混合 系の破壊強度が大きいという結果が得られた。そこでさらに、二種類のボンドの配置や電流分布と強度 の関係について詳しく調べた。伝導度の大きいヒューズが少量添加された系では、初期き裂の近くに伝 導度の大きいヒューズが存在することで、き裂先端の電流の集中が緩和され、その結果強度が大きくな ることが明らかになった。逆に、伝導度の小さいヒューズが少量添加された系において強くなる場合に は、それらのヒューズがき裂の進展する方向を逸らすという特徴があることが分かった。



Fig. 1. Conceptual scheme of random fuse model.



Fig. 2. Average strength of the composite systems, where r denotes the ratio of fuses of high conductivity.

References

[1] C. Urabe and S. Takesue, Phys. Rev. E 82, 016106 (2010).

ネオンクラスターの EUV-FEL 強度変化に伴う 光イオン化機構のクロスオーバー

不規則系物理学研究室 八瀬哲志

Abstract We study the interaction of Ne clusters with the intense extreme ultraviolet free-electron laser (EUV-FEL) pulses whose photon-energy is just below the ionization potential of Ne atom. The FEL intensity dependence of electron kinetic energy spectra reveals the cross-over of ionization processes of Ne clusters. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

近年、極紫外自由電子レーザー(EUV-FEL)の開発により、これまで未踏であった短波長領域でも強光 子場と物質の相互作用について研究が可能になってきている。中でも、希ガスクラスターは、サイズや 構成元素の調整が容易であること、周囲の環境へのエネルギー散逸がないこと、単純な系であること、 などの理由から、強光子場中の多体現象を調べる上で理想的な系であると言える。

これまでの研究によって、レーザーとクラスターの相互作用はレーザー波長によって大きく異なって おり、特に、光電場の影響はイオン化ポテンシャル I_p と光電場エネルギーの比である Keldysh パラメー ター γ の値によって分類できるということが知られている。近赤外(NIR)領域では、10¹⁵W/cm² 程度の 光強度において、 $\gamma \ll 1$ となり、その際、光電場が原子核のクーロン場と同程度の大きさとなる。した がって、光電場によるイオン化が支配的に発生し、そこからナノプラズマ形成を経て多数のイオンや電 子の放出が起こることが観測されている。

それに対し、EUV 領域では、波長が短く $\gamma > 1$ となることから、光電場による影響は小さい。この波長では、クラスターはまず多光子吸収によってイオン化し、多価イオン化したクラスターの強いクーロンポテンシャルが電子を捕捉することで、次第に NIR 領域と同様にナノプラズマ形成へと至る、ということ過程が報告されている。[1,2] この際、光電子の余剰エネルギーhv – I_p が大きいと光電子がクラスターのポテンシャルを超えやすくなる。それに対し、hv – I_p が小さい場合は、電子がクラスターに捕捉されやすくなることから、ナノプラズマ形成が効率的に発生することが予想される。

Ne 原子はイオン化エネルギー21.6 eV 直下に対応するレーザー波長を選択できるため、Rydberg 状態からナノプラズマを効率的に形成することが可能となる。一方、強光子場中の単原子のように、ある 光強度以上では、二光子イオン化が支配的になると考えられる。二光子イオン化の際、光電子は大きな 余剰エネルギーを持つため、ナノプラズマ形成は抑制される。このように、単原子的な多光子吸収とナ ノプラズマ形成という2つの異なるイオン化機構が競合する、すなわち、光強度の増加に伴い、ナノプ ラズマ形成から二光子イオン化へのイオン化機構のクロスオーバーを観測できることが期待される。

本研究では、EUV-FEL とクラスターの相互作用の光強度依存性について調べるため、電子・イオン の放出角度分布が測定可能な Velocity Map Imaging (VMI) 検出器を用いて電子分光測定を行った。理研 播磨研究所の SCSS 試験加速器から得られる EUV-FEL パルス光 (~10¹³ W/cm²) を Ne クラスター (<N>~5000)に照射し、その結果放出される電子の運動量を、VMI 検出器を用いて計測した。光の波長は Ne 原子のイオン化エネルギー(21.6 eV)より低い 61nm (20.3 eV) のパルス光を使用した。その結果、 電子のエネルギースペクトルの低エネルギー領域に Maxwell-Boltzmann 分布に類似した構造、高エネル ギー領域に幅の広いピーク構造が見られた。そして、これら各々の構造は全く異なる光強度依存性を示 すということが分かった。これらの光強度依存性は、まさに上記のナノプラズマ形成から二光子イオン 化へのイオン化機構のクロスオーバーを示していると考えられる。本発表では、これらの実験結果と、 Ne クラスターのイオン化機構のクロスオーバーについて考察を行う。

References

[1] H. Fukuzawa et al., Phys. Rev. A, 79, 031201(R) (2009)

[2] C. Bostedt et al., Phys. Rev. Lett. 100, 133401 (2008).

行列積波動関数を用いた 量子多体系のエンタングルメントについての研究

物性基礎論:凝縮系物理研究室 吉田清高

Abstract Matrix Product State (MPS) is a way to describe quantum many-body systems. This method has good properties to analyze the entanglement of the systems. We analyzed one-dimensional quantum spin systems using infinite Time-Evolving Block Decimation (iTEBD) which is based on systematic update of MPS. Topological properties of ground states are also discussed. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

量子多体系の解析の手段として、行列積波動関数(Matrix Product State)の方法[1][2]がある。これは多体の波動関数を行列の積で表す手法であり、模式的には(Fig.1)のようになる。



Fig. 1. MPS

 Γ , λ : MPS matrix i : physical index α , β : bond index

ここに、 Γ 、 λ は $\chi \times \chi$ (χ はボンド次元)の行列で、「i」は各サイト上の量子状態を指定する。本研 究では、行列積波動関数を虚時間方向に時間発展させることにより無限系の基底状態を計算する infinite Time-Evolving Block Decimation(iTEBD) [3][4]という方法を用いて解析を行った。

本研究で解析したのは(Fig. 2)のようなスピン 1/2の梯子系である。

 $J_2 = 0$ の状況で $|J_1| >> J, J_1 > 0$ のとき、Jの効果は無視できて、系の基底状態は「横木」の上に singlet が並んだような構造になる。しかし、 $|J_1| >> J, J_1 < 0$ のときは triplet が並んだ構造となり、 系のエンタングルメントが異なってくる。また J_2 が0 でないときも系のエンタングルメントは異なって おり、エンタングルメントが基底状態の性質を反映して変わると考えられる。

梯子系の基底状態のトポロジカルな性質の変化を、Fig.2の波線で MPS を切り取ってエンタングルメントを調べることで研究した。



References

Fig. 2. Two-Leg ladder. Spin 1/2s are sitting on filled circles.

[1] M.Fannes, B.Nachtergaele, and R.F.Werner, Comm.Math.Phys. 144, 443 (1992)

- [2] D.Perez-Garcia, F.Verstraete, M.M.Wolf, and J.I.Cirac, Quantum.Inf.Comput. 7, 401 (2007)
- [4] G.Vidal, Phys.Rev.Lett 98, 070201 (2007)
- [3] R.Orus and G.Vidal, Phys.Rev.B 78, 155117 (2008)