-Condensed Matter Physics Summer School 61th-

### "Find your Nobelty"

## 第 61 回 物性若手夏の学校

分科会 概要集

長野県 ホテルシャレードイン志賀 7月31日(日) 15:30-18:00

公演時間 15分(発表10分、質疑応答5分)

<u>分野 A</u>	(教室1)		
座長:洋	睪端日華瑠		
A-1	反転対称性の破れた物質中に	における非相反輸送現象	15:30-15:45
	濱本敬大	東京大学工学系研究科	10.00 10110
A-2	三次元層状極性半導体におけ	る非相反電荷輸送現象	
	→√√20目(CEI2 + 01 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 +	<b>甫</b> 百十学十学院丁学系	15:50-16:05 研空利
٨.2	応用発気な地にお用するノー		471 7647
A-3	全间研入你住に起因りるノー	クルノイン十述病	16:10-16:25
		東工大理	
	—1:	5 分休憩—	
座長:消	資本敬大		
A-4	微小磁性体における高周波	「電流雑音」測定系の開発	
			16:40-16:55
	岩切秀一	大阪大学大学院理学研	究科
A-5	量子ドット系における温度・	電圧誘起断熱ポンピング	
			17:00-17:15
	長谷川雅大	東大物性研	
A-6	トポロジカル絶縁体 Bi <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> の	の軌道選択スピン分解光電子分	光
			17:20-17:35
	野口亮	東大物性研	
分野 E	3(教室 5)		
座長: 釒	令木浩平		
B-1	キタエフモデルの統計力学的	な性質	
			15:30-15:45
	ミシェンコーピョー	トル 東京大学大学院工学系	研究科
B-2	Kitaev 模型における量子スト	シンの行列要素	
			15.50-16.05
	<b></b>	<b> </b>	· 化研究科
<b>B_3</b>	スピン偏極した量子ホール・	お伝道状能部合状能での電子	<u>俞送特性</u>
<b>D</b> J			16.10-16.25
	上田健人	<b>甫</b> 古大学工学系研究和	10.10-10.2 <i>3</i>
	上口使八	<u>- 未永八子工子永妍九</u> 5 公休甜	T
成長・同		5 万怀恋—	
座衣:图		孙中国八韶北京法測学社の国家	8
B-4	励起相関伝を用いたノエムト	19时间分胜兀电侃侧正伍9月9	E 16:40-16:55
	体川大古	イボージージャー	10:40-10:33 777:451
D 5	世川拍具		·允科
В-3	X 緑吸収分光で探る布土類化	と合物の磁性の起源	
			17:00-17:15
-	甲谷泰博	版大院基礎工	
B-6	極性キフル磁性体 Ni <sub>2-x</sub> Mn <sub>x</sub> I	nSbO <sub>6</sub> における磁気特性及び電	気磁気効果
			17:20-17:35
	荒木勇介	東大新領域	
B-7	タイトル未定		
			17:40-17:55
	PARK SANGEUN	上智大学理工学研究科	

#### <u>分野 C(教室 6)</u>

坐長:1	絛竒美沙亠		
C-1	カイラル立方晶 LaIrSi のフェルミ面	「上のスピン構造	15:30-15:45
	小宮亮	神戸大学大学院理学研究	印.5015.15
C-2	カイラル結晶における自然円二色性	とその角度依存性	
	勝本啓資	阪大産研	15:50-16:05
C-3	強相関電子系における電子と正孔の	振る舞い	
	松下剛	大阪大学基礎工学研究科	16:10-16:25
	—15分(	木憩—	
座長:	ミシェンコピョートル	<b>炊</b> ].	
C-4	イノル酸性性におけるマイクロ仮応	合く电弧効木	16.40-16.55
	蒋男	東京大学総合文化研究和	4
C-5	バナジウムスピネル酸化物 CoV <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	の結晶構造解析と軌道整列	
		╓┍╴┍┼╴╽╷╓┷╶┲╖	17:00-17:15
C	ト野聖大 六古県委士類フェライト FrFaO、藩	版府てに埋	
C-0		医沙耳耶 电压 化 风化 ///	17:20-17:35
	實川隼輔	千葉大院理	1,120 1,100
C-7	π-d 系有機導体 λ-(BETS) <sub>2</sub> FeCl <sub>4</sub> の相轉	云移	
			17:40-17:55
ᄊᄪᆇᆂ	矢作聡汰	東邦大学大学院理学系研	开究科
<u>分野</u>	D (教至 8+9) <sub>封士拗士</sub>		
座天:  D-1	図刀翔太 不純物効果から見た重い電子系紹伝	道体 CeCusSi。のギャップ構	告
			15:30-15:45
	弘中恭平	東大新領域	
D-2	ネマティック感受率測定による銅酸	化物高温超伝導体における電	子系の回転
对称性(	の破れの検証	甫大新領城	15:50-16:05
D-3	毎日日初 鉄系紹伝導体 FeSe の圧力下電子相関	家へ利原政	
			16:10-16:25
	新井佑基	東大新領域	
应言	—15分(	木想—	
座衣: <del>;</del> D-4	卅上向仏 ■雷解質ゲートを用いた n 型銅酸化物高	温超伝導体における超伝導絶	縁体転移制御
			16:40-16:55
	松岡秀樹	東京大学大学院工学系研	F究科
D-5	鉄系超伝導体におけるフェルミ面縮	小効果	
	型曲影巨先	古邦十学十学院人用,理	17:00-17:15
D-6	一層系銅酸化物招伝導体における斥	□ 示御八子八子阮八间• ÿ 力起源 <sup>一</sup> 雷子交換散乱強度 <i>0</i>	99月子如九件
			17:20-17:35
	寺西慎伍	大阪大学基礎工学研究和	4
D-7	<ul> <li>         ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ul>	<u>大阪大学基礎工学研究和</u> 伝導対称性	17.40.17.55

#### <u>分野 E(教室 3+4)</u>

座長:注	濵村一航		
E-1	量子状態の断熱制御と非線形可積	分系	
			15:30-15:45
	奥山真佳	東工大	
E-2	非平衡定常状態における量子ゆら	ぎ定理: 可解モデルによる解析	
			15:50-16:05
	諸留昇平	早大理工	
E-3	小さな孤立量子系における ETH 招	揺らぎの普遍的な比	
			16:10-16:25
	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	東大理	
	—15 ģ	分休憩—	
坐長:			
E-4	量子論における操作の両立不可能	性	
	N	- to teta 1 - NY	16:40-16:55
	濱村一航	泉都大字 パンジェンジョン	
E-5	境境のノイストにおける量子アニ	ーリングの計算時間	
			17:00-17:15
<b>T</b> (	局田垛武已 耕城之 ※ 是田、 人 一、 ※ 、 ビニー 世	果上大埋 克·匹杜 & 化二	
E-6	熱揺らきを用いたスピングラス基	低状態の復元	
			17:20-17:35
	西村光嗣	果 上 大 埋	
八元工			
<u> </u>			
	化生人即		
F-1	神胞動力子で見る不マナックな集	凹連動	15.20 15.45
	1. 注册/一	<b>東京十份十份院理份</b> 奚江	13:30-13:43
E 2	<u> しまでたごれたわけて</u> タ 洋州の形	<b>来</b> 京人子人子阮理子亲研	允件
Г-2	力子系モアルにわける多体性の形	风	15.50 16.05
	- 市津吉	<b>東京十尚十尚陀公本</b> (4)	13:30-10:03
E 2	四佃但八	果尔八子八子阮菘石又化 <u>の无力之地細<u>た細</u>た</u>	柳九科
r-3	擬似的丹师を用いた入向福石子像	0个女正19月种机	16.10 16.25
	進ませる	<b>東京工業上学理学</b> 院	10:10-10:23
	<u> </u>	中国家	
	—13 7	万怀思—	
座女:」		ジボゲイナミカフ	
г-4	僧伽-品伽透修にわりるハダーン用	シルタイナミクス	16.40 16.55
	プ川丰雄	古邦十学十学院田学江苑	10:40-10:33 숙비
E 5	ロ川寿雄	<u>,</u> 京都人子人子阮理子研先 教力受	件
F-3	ヒストン糸のストキャスケイツク	熬刀子	17.00 17.15
	離ウ亚	北古上田	1/:00-1/:15
		北京大理	
F-6	重十糸の熱力子弗一法則~クオン	ダムでビュナな熱俗にし~	17.00.17.25
	人又和书	<b>事会上兴中级 A 去</b> 儿	1/:20-17:35
F 7	金丁和蔵	果 泉 大 字 大 字 阮 総 合 又 化	<b>研</b> 究科
F-/	「宣報問題」T ソンソンに ちにてん Onsage	r(1) http://www.example.com/and/and/and/and/and/and/and/and/and/and	
	同報語的二 ジ ジ ジ (CASI) S Olisage		1
			17:40-17:55

#### 反転対称性の破れた物質中における非相反輸送現象

#### 東京大学工学系研究科物理工学専攻<sup>A</sup>,理研 CEMS<sup>B</sup> 濱本敬大<sup>A</sup>,江澤雅彦<sup>A</sup>,永長直人<sup>A,B</sup>

#### Keywords:反転対称性の破れ,非線形伝導

高い対称性を持つ物質中では、多くの応答が対称性により禁じられる。このことは系の 記述を容易にするが、同時に物質の多様性やデバイスとしての応用可能性を大きく制限 してしまっている。そこで近年、空間反転対称性を破った超伝導体、磁性体、半導体等に おける、異方的なペアリングや非共面的なスピン構造、ワイル半金属相など、多様な量子 相、電磁応答が注目を集めている。

反転対称性の破れに起因する新奇な応答は、最も基本的な応答である電気伝導にも存 在する。今回紹介する非相反電気伝導現象は、電気抵抗(伝導度)が電流の方向に依存し て値を変える現象であり、カイラリティを有する有機分子や、カーボンナノチューブ[1]、 磁場下のFET 界面[2]などで観測がなされている。この効果は以下の現象論的な式で説明 される。

$$R(I) = R_0(1 + \gamma IB) \quad \Rightarrow \quad R(I) = R(-I)$$

このように電流に依存する抵抗値は本質的に非線形の電気伝導効果であり、非線形光学の 分野で知られた第二高調波発生と同様に反転対称性の破れを必要とする。またこの効果は 電流の整流作用ととらえることもでき、天然のダイオードとしての応用可能性も考えら れる。

今回の発表では、このような非線形な電気伝導を扱う簡便な計算手法と、非相反性の起源の分類、具体的な系における計算結果等を紹介する。

[1] V. Krstic et. al. J. Chem. Phys. 117, 11315 (2002).

[2] G. L. J. A. Rikken and P. Wyder, *Phys. Rev. Lett.* 94, 016601 (2005).

#### 三次元層状極性半導体における非相反電荷輸送現象

#### 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 A,

理化学研究所創発物性科学研究センターB

#### <u>越川 翔太</u><sup>A</sup>, 井手上 敏也<sup>A</sup>, 濱本 敬大<sup>A</sup>, 江澤 雅彦<sup>A</sup>, 金子 良夫<sup>B</sup>, 永長 直人 <sup>A,B</sup>, 十倉 好紀 <sup>A,B</sup>, 岩佐 義宏 <sup>A,B</sup>

#### Keywords: Rashba 系, 層状物質, スピン軌道相互作用, 実験

空間反転対称性の破れに起因した物性には非従来型超伝導状態や磁性と誘電性の結合 であるマルチフェロイック等の様々な興味深い現象が数多く存在する。これは、空間反転 対称性の破れた結晶では、電子バンドのスピン分裂に代表されるように、結晶対称性の破 れを反映した特異なスピン軌道相互作用が固体の電子状態に本質的な影響を与えるため であると考えられる。そのような空間反転対称性の破れに起因する物性の一つに非相反電 荷輸送現象がある。この現象は電流を流す向きによって電気抵抗値が変わるというもので、 電流に関する二色性と捉えることができる。

本発表では、近年新しく発見された巨大な Rashba 型スピン分裂バンドを持つ層状化合物である BiTeX(X=I,Br)に着目し、空間反転対称性の破れに起因した電荷-スピン輸送の検証と新現象開拓に取り組むことで、三次元極性半導体において初めて非相反電荷輸送現象を観測すると同時に、その特徴的な振る舞いを明らかにしたことを述べる。



### 空間群対称性に起因するノーダルライン半金属

東工大理<sup>A</sup>,東工大元素戦略研究セ<sup>B</sup> 高橋亮<sup>A</sup>,村上修一<sup>A,B</sup>

Nodal line semimetals arising from crystal symmetry

#### Dept. Phys., Tokyo Inst. Tech.,<sup>A</sup>, TIES, Tokyo Inst. Tech.<sup>B</sup> Ryo Takahashi<sup>A</sup> and Shuichi Murakami<sup>A,B</sup>

#### Keywords:ワイル半金属、ノーダルライン半金属、映進対称性

通常、エネルギーバンドは準位反発により、波数空間の一般の点では縮退点を持たない。対称性の高い点では、対称性の要請からエネルギーバンドが縮退することがあり、このような縮退は空間群の既約表現の理論を用いて理解される。一方、既約表現だけからでは予想できない縮退を持つ物質も存在する。そのような物質群はトポロジカル半金属と呼ばれ、近年注目を集めている。

ノーダルライン半金属はトポロジカル半金属の一種であり、波数空間の一般の点に線状 の縮退点(ノーダルライン)を持つ物質である。ノーダルラインは、ベリー位相と呼ばれ るトポロジカル数によって保護されており、空間反転対称性と時間反転対称性を壊さない 限り安定して存在できる。

ノーダルラインが出現するための必要条件として、次の二つのいずれかを満たせばよい ことが知られている:

1: 空間反転対称性と時間反転対称性を持ち、スピン軌道相互作用が無視できる。

2: 鏡映対称性もしくは映進対称性を持つ。

しかし、これらの条件は十分条件ではない。ノーダルラインは偶然縮退により出現してお り、偶然縮退は普通は対称性だけでは判断できないものだからである。このため、物質が 持つ対称性だけから、それがノーダルライン半金属か否かを判断するのは不可能だと思わ れてきた。

我々は、空間群 No.135 を持つスピンレスの系の模型を用いて、ノーダルラインが必ず 出現することを示した。特に、空間群の既約表現を詳しく分析することで、この空間群に おいては、ノーダルラインの出現が模型の対称性だけから判断できることを示した。この 結果は、模型が鏡映対称性と映進対称性の両方を持ち、それらが特別な関係にあることに 起因しており、他にも同様の性質を持つ空間群が複数存在する事も明らかにした。講演で は、模型でノーダルラインが出現する様子を紹介し、何故ノーダルラインが必ず出現する と言えるのかについて、鏡映固有値を用いて簡単に説明する。

 B. J. Wieder, Y. Kim, A. M. Rappe, and C. L. Kane, Phys. Rev. Lett. 116, 186402 (2016). A-4

#### 微小磁性体における高周波「電流雑音」測定系の開発

大阪大学大学院理学研究科物理学専攻<sup>A</sup>,物質・材料研究機構<sup>B</sup> 岩切秀一<sup>A</sup>,則元将太<sup>A</sup>,荒川智紀<sup>A</sup>,葛西伸哉<sup>B</sup>,新見康洋<sup>A</sup>,小林研介<sup>A</sup> Development of high frequency current noise measurement system in micromagnets. <sup>A</sup>Department of Physics, Graduate School of Science, Osaka University, <sup>B</sup>National Institute for Material Science Shuichi Iwakiri<sup>A</sup>, Shohta Norimoto<sup>A</sup>, Tomonori Arakawa<sup>A</sup>, Shinya Kasai<sup>B</sup>, Yasuhiro Niimi<sup>A</sup>, Kensuke Kobayashi<sup>A</sup>

#### Keywords: メゾスコピック系,電流雑音,磁気接合,マグノン

試料に一定電圧を印加すれば直流電流が流れる。このとき測定系の誤差が全くなかったとし ても、原理的に電流は平均値の回りを時間的にゆらぐ。このゆらぎが電流雑音である。 電流雑 音は、量子ドットや微小接合などメゾスコピック系における電子伝導過程を探る有力なプローブ となる。

電流雑音は幅広い周波数成分からなり、従来は低周波(~数10MHz)の測定が主流であった。 しかし近年、GHz以上の高周波数領域の電流雑音が注目されている。その領域は大きく分けて 二つの特徴をもつ。

すなわち、

①系を特徴付けるエネルギースケールと周波数が同等である(たとえば量子ドットの準位間隔 は 10ueV~数 GHz)

②熱ゆらぎの効果が顕著にならず、量子コヒーレンスが保たれる(たとえば 01K~2GHz)

である。

数 GHz 以上の電流雑音を測定することで、量子系の伝導ダイナミクスを直接的に研究できる[1]。

さて、強磁性体を絶縁体や常磁性体と接合した系(たとえばトンネル磁気接合と呼ばれるもの) は主に応用への興味から研究されているが、低温でのマグノン励起やその量子相関など基礎 物理の観点からも興味深い。本研究では「マグノンの量子性・ダイナミクスの検出」を目標にし、 「高周波の電流雑音測定系の開発と評価」を行った。

[1]K. Thibault et al., Phys. Rev. Lett {114}, 236604 (2015).

#### 量子ドット系における温度・電圧誘起断熱ポンピング

#### 東大物性研 長谷川雅大,加藤岳生 Temperature and electrochemical-potential driven adiabatic pumping in a quantum dot *ISSP, The University of Tokyo* Masahiro Hasegawa and Takeo Kato

## Keywords:量子ドット、断熱ポンピング, quantum dot, adiabatic pumping

量子ドット(図1)とは、少数のエネルギー固有状態を持つ人工的な系であり、近年の表 面微細加工技術の発展により半導体表面上に作成することが可能となった。この量子ドッ トに複数の電極(電子浴)を接続した際の量子ドットを介した電子の非平衡輸送特性は、量 子的な性質が輸送に強く現れるため研究が盛んに行なわれている。そういった輸送現象の 一つとして、周期的なパラメーター変調によって粒子あるいはエネルギーを電子浴間でや りとりするポンピング現象がある。例えば、量子ドットと電子浴が強く結合している領域 (コヒーレント伝導領域)において、電子浴に断熱的かつ周期的な温度・電圧変調を印加し た際に、電子浴から電子浴へ電荷をポンプすることが可能である。本発表では、そのよう なポンピングについて定性的・定量的な理解を発表する[1]。

断熱的かつ周期的な温度・電圧変調がある電子浴を2つ、ドット内に電子間相互作用の ある単一準位量子ドットに強く結合させたモデルを用いる。ポンピングの定式化には非平 衡グリーン関数法を用い、電子間相互作用について摂動的に取り扱った。

本発表では、量子ドットでポンピングが発生する機構を説明し、その数値計算による定 量的評価 (図 2) も示す。





図 1: 本講演で対象とする輸送のセットアッ プ。半導体表面上に微細加工を行うことで量 子ドット状態を作る。

図 2: 温度変調を電子浴を印加した際に流れるポンプ電流の定量評価。

[1] M.Hasegawa and T. Kato, arXiv:1601.05812 (2016).

#### トポロジカル絶縁体 $\mathbf{Bi}_2\mathbf{Se}_3$ の軌道選択スピン分解光電子分光

#### 東大物性研<sup>A</sup> 野口亮<sup>A</sup>, 黒田健太<sup>A</sup>, 矢治光一郎<sup>A</sup>, 近藤猛<sup>A</sup>, 小森文夫<sup>A</sup>, 辛埴<sup>A</sup> Orbital-dependent SARPES of Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> *ISSP, The University of Tokyo<sup>A</sup>* Ryo Noguchi<sup>A</sup>, Kenta Kuroda<sup>A</sup>, Koichiro Yaji<sup>A</sup>, Takeshi Kondo<sup>A</sup>, Fumio Komori<sup>A</sup>, Shik Shin<sup>A</sup>

トポロジカル絶縁体の表面には、スピン軌道相互作用によってスピン偏極した電子状態が現れ る。このようなスピン偏極した電子状態は、スピントロニクスや量子コンピュータといった応用 面から注目されているだけでなく、固体中の新奇な電子状態としても盛んに研究されている[1]。 代表的な三次元トポロジカル絶縁体として知られる Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> は、その発見以来様々な実験手 法で研究がなされてきた [1,2]。特にスピン分解角度分解光電子分光(SARPES)は物質中の スピン偏極した電子状態を直接的に観測できる有力な手法であり、Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> のスピン偏極表 面状態に関しても複数の SARPES 実験の報告がある [3,4]。しかし、Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> においてはスピ ン軌道相互作用によってスピンと軌道が結合した電子状態が形成されることが理論的に考 えられており、励起光の偏光や装置のジオメトリまで含めないと正確な実験の検証をする ことが出来ない [5]。しかし、適切な装置配置で、励起光の偏光を光電子放出過程の反応面 に関して *p*-pol. *s*-pol. とすると、波動関数の偶対称・奇対称成分を分離した測定を行える。

図??は、励起光であるレーザー 光の偏向を光電子放出過程の反 応面に関して p-pol.・s-pol.とし た場合の SARPES 測定の結果で ある。実験結果から、p-pol. で は+y方向、s-pol. では-y方向に スピン偏極した電子状態を選択 的に測定できていることが確認 された。この実験結果と解釈は、 Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>のトポロジカル表面状態 においてスピンと軌道が結合し ていることを示しており、トポ ロジカル絶縁体のみにとどまら ず、スピン軌道相互作用由来で スピン偏極した固体中の電子状 態への理解を深めるものである。

- [1] M. Hasan and C. Kane, Rev.
- Mod. Phys. 82, 3045 (2010).
- [2] Y. Xia, et al., Nat. Phys. 5, 18 (2009).
- [3] C. Jozwiak, et al., Nat. Phys. 9, 293 (2013).
- [4] Z. H. Zhu, et al., Phys. Rev. Lett. 112, 076802 (2014).
- [5] H. Zhang, et al., Phys. Rev. Lett. 111, 066801 (2013).



図 1: (左)励起光を *p* -pol. とした場合の三次元スピン分解 結果。(右)励起光を *s* -pol. とした場合。

#### キタエフモデルの統計力学的な性質 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 ミシェンコ ピョートル

#### Keywords:キタエフ模型,自由度の分数化,モンテカルロシミュレーション

近年,量子磁性体におけるマヨラナフェルミオン探索という新しい潮流が生まれた.それ はアレクセイ・キタエフによる蜂の巣格子上の量子スピン模型であるキタエフ模型の提案 [1]を切っ掛けに始まった.ここでは単独粒子としてのマヨラナフェルミオンの性質だけで なく,量子多体系としての集団的な性質も詳細に調べられる可能性がある.

上記の研究は,キタエフ模型の基底状態が量子スピン液体であり,マヨラナフェルミオン によって記述されるためだけでなく,一部のイリジウム化合物ではキタエフ模型が良い記 述を与えるという指摘 [2] などによっても促進されている.

今回は、マヨラナフェルミオン表示を用いたモンテカルロ法の改良方法に関して説明する.具体的には、従来の手法で計算コストの極めて高い厳密対角化の部分にチェビショフ多項式展開法 [3] を適用し、今までより大きな系を扱えるような計算方法を紹介する.

また,量子スピン液体などの新規量子状態探索の観点から注目を集めているハイパーオ クタゴン格子 [4] の熱力学的な性質を議論し、様々な三次元格子を紹介する.

図 1: キタエフモデルとスピンの分数化

図 2: ハイパーオクタゴン格子



#### 参考文献

- [1] A. Kitaev, Ann. Phys. **321**, 2 (2006).
- [2] G. Jackely and G. Khaliullin, Phys. Rev. Lett. **102**, 017205 (2009).
- [3] A. Weisse, Phys. Rev. Lett. **102**, 150604 (2009).
- [4] M. Hermanns and S. Trebst, Phys. Rev. B 89, 235102 (2014).

#### Kitaev 模型における量子スピンの行列要素

#### 東京大学大学院総合文化研究科 越田真史

Matrix elements of quantum spins in Kitaev's honey-comb lattice model Department of Basic Science, The University of Tokyo Shinji Koshida

#### Keywords: Kitaev 模型,量子スピン液体,トポロジカル秩序

ハニカム格子上の Kitaev 模型は [1] で導入された量子スピン系の模型であり、そのハミ ルトニアンは

$$H_{\rm Kit} = -\frac{1}{2} \sum_{\mu=1,2,3} \left( J_{\mu} \sum_{(x,y)\in B^{\mu}_{\Lambda}} S^{\mu}_{x} S^{\mu}_{y} \right)$$

の形で与えられる.ここで、ハニカム格子  $\Lambda$ のボンドは3種類 ( $\mu = 1,2,3$ ) に分類され、 それぞれの種類のボンドの集合を  $B_{\Lambda}^{\mu}$  と表記している.この模型の解析方法として、境界 条件をうまく設定して Jordan-Winger 変換によりフェルミオン系の問題にマップする方 法 [2] があるが、ここでは Kitaev[1] によって与えられた、ヒルベルト空間を拡張する方法 を考える.この方法では拡張されたヒルベルト空間に作用するマヨラナフェルミオンを導 入し、マヨラナフェルミオンの組み合わせで作られる作用素のある部分空間(物理的な部 分空間と呼ぶ) への制限として量子スピンの作用素を実現する.すると、Kitaev 模型を 解く問題は、 $\mathbb{Z}_2$ -ゲージ場に結合したマヨラナフェルミオン系の固有状態を物理的な部分 空間へ射影する問題へと置き換わる.しかもゲージ場とマヨラナフェルミオンのハミルト ニアンが可換なことから、ゲージ場の配位を決めたハミルトニアン (タイトバインディン グ模型)を解けば良いことになる.この方法により、Kitaev 模型の様々な性質が調べら れてきた [3-6].特に、静的な相関関数に関しては強力な結果が得られている [3].

一方,動的な相関関数を計算しようとすると、マヨラナフェルミオンのハミルトニアン を対角化した基底による量子スピンの行列要素が分からないために、困難が生じる.本講 演では、この行列要素の計算を目標に、拡張されたヒルベルト空間の構造と、その上での マヨラナフェルミオンの作用を考察する.

- [1] Alexei Kitaev, Ann. Phys. **321**, 2 (2006).
- [2] Han-Dong Chen and Zohar Nussinov, J. Phys. A: Math. Theor. 41, 075001 (2008).
- [3] G. Baskaran *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 247201 (2007).
- [4] Fabio L. Pedrocchi *et al.*, Phys. Rev. B **64**, 165414 (2011).
- [5] Ville Lahtinen et al., Ann. Phys. **323**, 2286 (2008).
- [6] Olga Petrova et al., Phys. Rev. B 90, 134404 (2014).

#### スピン偏極した量子ホール・超伝導状態競合状態での電子輸送特性

#### 東京大学工学系研究科物理工学科 樽茶・山本研究室 上田 健人

#### Keywords:超伝導、量子ホール効果、アンドレーエフ反射、スピン偏極

常伝導と超伝導の界面に、常伝導側から電子が入射するとアンドレーエフ反射という物 理現象によって電子ではなくホールが反射される[1]。このアンドレーエフ反射を介して、 常伝導である二次元電子ガス(2DEG)に磁場をかけることで生じる量子ホール状態と超伝 導状態の競合状態、さらにはその競合状態でのスピン依存性を観測するために、超伝導体 と二次元電子ガス(2DEG)を接合したデバイスを作製することを試みた。

このデバイスを用いて、最初に磁場とゲート電圧をそれぞれ変 化させて、コンダクタンスを測定し、この測定によって、ゼーマ ン効果によってスピン分裂した量子ホール効果の観測に成功し た。

次に、量子ホール状態と超伝導状態が競合しているかを調べる ために、各磁場でゲート電圧とバイアス電圧を変化させてコン ダクタンスを測定したところ、超伝導ギャップの存在を確認で き、量子ホール状態と超伝導状態の競合状態の観測に成功した。

超伝導ギャップ中のコンダクタンスを観察したところ、超伝導

ギャップ中で凹凸構造を観測した。この構造は、紛れもなくアンドレーエフ反射によるも のであり、さらにこの構造には量子ホール状態におけるバルクとエッジの効果、スピンの 依存性が関与していると考えられた。実際、この結果はスピンを含んだアンドレーエフ反 射のモデルで説明できることが分かった。

従って、量子ホール状態と超伝導状態の競合状態でのアンドレーエフ反射には、スピン の影響が反映されると分かった。

今回、実験で得られたデータと共に、実際に量子ホール状態と超伝導状態の競合状態で はどのような物理現象が起きているのかを説明する。

[1] a. F. Andreev, Soviet Physics Jetp 20, 1490 (1965).

NbTi InAs NbTi 20 µm

Optical image of our InAs-NbTi device.

#### 励起相関法を用いたフェムト秒時間分解光電流測定法の開発

千葉大学大学院 理学研究科<sup>AB</sup> 笹川 拓真<sup>A</sup>,山田 泰裕<sup>B</sup>

#### Development of femtosecond excitation correlation method for time-resolved photocurrent spectroscopy.

Department of physics, graduate school of science, Chiba University.<sup>AB</sup> T. Sasakawa<sup>A</sup> and Y. Yamada<sup>B</sup>

#### Keywords:光物性、光電流、励起相関法、超高速時間分解測定

本研究はフェムト秒レーザーを用いた光物性の研究である。1990年代に比較的容易に 扱える固体フェムト秒レーザーが普及し、この20年で物性物理や材料科学の研究が飛躍 的に進歩してきた。超短パルスレーザーの発展により光と物質の相互用作用がとても短い 時間軸で見ることが出来るようになり、また現在も短パルス化が進み100フェムト秒から 10フェムト秒、あるいはアト秒の領域にまで及んでいる。これにより分子や原子の動き はもとより、電子の運動もスナップショットでとらえることが可能となっている。

この超短パルスレーザーを用いた高い時間分解能を持つ測定法は超高速分光(超高速時間分解分光)と呼ばれ、様々な手法が開発されてきた。もっとも一般的なものはポンププローブ法と呼ばれる手法で、2つに分けたパルス光に時間差をつけて目的試料に入射することで、その時間差に対する過渡的な現象を選択的に観測することが出来る。

他にも測定試料や目的に合わせて様々な超高速分光法があるが、そのすべてが万能という わけではない。そこで本研究では反射や透過、発光以外の量として光電流(光伝導)に注 目した。光電流は電子や正孔の動きそのものであり、太陽電池、光センサーなどの光電子 デバイスでも重要な役割を果たしている。この電子や正孔の動きは極めて短い時間スケー ルでおこるため通常の電気的測定では観測できない。逆に言えば光電流の超高速時間分解 測定が可能となれば電子-正孔ダイナミクスのより詳細な分析が可能となり、光電子デバ イスへの応用に直接つながる。このような背景から新たに超短パルスレーザーを用いた光 電流の超高速分光法の開発を行い、その評価を行った。

高い時間分解能を持つ光電流の測定法として発光の時間分解測定法の一つである励起相 関法(FEC:Femtosecond Excitation Correlation)を用いた。励起相関法とは半導体中に おいて、キャリア密度に対し発光強度が非線形な応答をすることを利用し、光キャリアの 緩和ダイナミクスを観測する手法である。発光強度以外に光電流に対しても非線形性が観 測されるため本研究ではこの励起相関法を用いて光電流の時間分解測定の開発を行って いる。

[1] Y. Yamada et al., Appl. Phys. Lett.107,013905 (2015).

[2] Y. Miyauchi et al. Phys. Rev. B 80,235433 (2009).

X線吸収分光で探る希土類化合物の磁性の起源

阪大院基礎エ<sup>A</sup>,理研 SPring-8<sup>B</sup>,甲南大理エ<sup>C</sup>,原子力機構量子ビーム<sup>D</sup>、 SPring-8/JASRI<sup>E</sup>, 京產大理<sup>F</sup>, 広大先端<sup>G</sup>, 静岡大理<sup>H</sup>

中谷泰博<sup>A,B</sup>,荒谷秀和<sup>A,B</sup>,金并惟奈<sup>A,B</sup>,森健雄<sup>A</sup>,山神光平<sup>A,B</sup>,内免翔<sup>A,B</sup>, 

山上浩志<sup>D,F</sup>,田中新<sup>G</sup>,室隆桂之<sup>E</sup>,海老原孝雄<sup>H</sup>,斎藤祐児<sup>D</sup>,関山明<sup>A,B</sup>

Origin of magnetic properties of rare-earth compounds probed by X-ray absorption spectroscopy

Osaka Univ.<sup>A</sup>, SPring-8/RIKEN<sup>B</sup>, Konan Univ.<sup>C</sup>, JAEA<sup>D</sup>,

SPring-8/JASRI<sup>E</sup>, Kyoto Sangyo Univ.<sup>F</sup>, Hiroshima Univ.<sup>G</sup>, Shizuoka Univ.<sup>H</sup>

<u>Y. Nakatani</u><sup>A,B</sup>, H. Aratani<sup>A,B</sup>, Y. Kanai<sup>A,B</sup>, T. Mori<sup>A</sup>, K. Yamagami<sup>A,B</sup>, S. Naimen<sup>A,B</sup>, H. Fujiwara<sup>A,B</sup>, T. Kiss<sup>A,B</sup>, A. Yamasaki<sup>C</sup>, A. Yasui<sup>D,E</sup>, Y. Takeda<sup>D</sup>, H. Yamagami<sup>D,F</sup>, A. Tanaka<sup>G</sup>, T. Muro<sup>E</sup>, T. Ebihara<sup>H</sup>,

Y. Saitoh<sup>D</sup>, and A. Sekiyama<sup>A,B</sup>

Keywords:物理,実験,放射光,X線吸収分光,磁気円二色性,希土類,磁性,4f 電子

強力な永久磁石 Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B に代表されるように,「希土類元素 + 遷移金属元素 (+ 非磁 性元素)」の組み合わせは、希土類 f 電子の大きな飽和磁化と遷移金属 d 電子の強い交換 相互作用が働き、磁性現象を始めとして物理的にも興味深い現象を引き起こす、その中で も 4f<sup>1</sup> 配置に近い Ce 化合物は, Ce 4f 電子と遷移金属の伝導電子との混成により磁性と 超伝導が共存する系として、古くから研究が行われている.本研究では、低温で超伝導を 示し [1] 伝導電子の有効質量が異常に増大する [2] CeNi<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub> を取り上げる.

CeNi<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub> には Ce と Ni の 2つの磁 性元素が含まれているが, 両元素の吸収 端が異なるため、左右両回り円偏光によ り上下スピンを別々に取り出した X 線吸 収分光 (磁気円二色性) を用いることで 元素ごとの磁性の情報を取り出すことが できる. 図1 に, SPring-8 BL23SU にお いて外部磁場 10 T, 温度 8 K の元で測定 した CeNi<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>の円偏光依存 X 線吸収 の結果を示す. Ni 吸収端の二色性に比べ て Ce 吸収端の二色性が非常に大きいこ とから、CeNi2Ge2の磁性の大部分を Ce 4f 電子が担っていることがわかる. さ



図 1: 左右両回り円偏光で観測した CeNi<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub> の X 線吸収スペクトル (上) 及びそれらの差分 (下). 図中 の挿入絵は CeNi<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub> の基底 4f 電荷分布.

らに吸収分光の結果を f 電子の結晶場分裂を考慮したスペクトル計算 [3] と対応させる ことで、Ce 4f 電子の基底状態の電荷分布を 図1の挿入絵のように決定することができ た.この電荷分布から CeNi2Ge2 の帯磁率の異方性を説明することが可能である.このよ うに、希土類遷移金属合金の磁性を解明する上で、X線吸収分光は強力な手法となる。

- [1] F. M. Grosche et al., J. Phys. Condens. Matter 12, L533 (2000).
- [2] F. Steglich *et al.*, J. Phys. Condens. Matter 8, 9909 (1996).
- [3] A. Tanaka and T. Jo, J. Phys. Soc. Jpn. 63, 2788 (1994).

#### 極性キラル磁性体 Ni<sub>2-x</sub>Mn<sub>x</sub>InSbO<sub>6</sub>における磁気特性及び電気磁気効果 東大新領域

荒木 勇介, 阿部 伸行, 徳永 祐介, 有馬 孝尚

Magnetic and magnetoelectric property of polar magnet Ni<sub>2-x</sub>Mn<sub>x</sub>InSbO<sub>6</sub> Department of Advanced Materials Science, University of Tokyo, Kashiwa

Yusuke Araki, Nobuyuki Abe, Yusuke Tokunaga, Takahisa Arima

#### Keywords: 強相関電子系, multiferroics, 磁性

磁性と強誘電性が共存する multiferroics は 2003 年 TbMnO<sub>3</sub> における螺旋磁性に伴った電 気分極発現と磁場による電気分極の 90°回転の発見を機に、現在に至るまで盛んに研究 が行われている[1]。また、skyrmion と呼ばれる渦状の磁気構造は、次世代磁気デバイス へ期待される多くの特性をもつことが検証されている。従来、Bloch 型と呼ばれる skyrmion 格子のみがキラル結晶構造物質で観測されていたが、2015 年、アキラル極性結晶構造を もつ GaV<sub>4</sub>S<sub>8</sub> において Néel 型の skyrmion 格子が観測された[2]。この報告から、極性結晶 構造においても skyrmion 格子の実現が期待される。

本発表で扱う Ni<sub>2-x</sub>Mn<sub>x</sub>InSbO<sub>6</sub>は、キラル反強磁性焦電体 Ni<sub>3</sub>TeO<sub>6</sub>を母物質として、Ni<sup>2+</sup> サイトに Mn<sup>2+</sup>、In<sup>3+</sup>を、Te<sup>6+</sup>サイトに Sb<sup>5+</sup>をドープしたものである。Ni<sub>2</sub>InSbO<sub>6</sub>は Ni<sub>3</sub>TeO<sub>6</sub> と同様の空間群 R3 に属した構造をとっており、転移温度 76 K 以下で ab 平面内に磁気伝 播ベクトルをもった螺旋磁性を示すことが多結晶体において報告されている[3]。また、 In<sup>3+</sup>サイトを Sc<sup>3+</sup>で置換した Mn<sub>2</sub>ScSbO<sub>6</sub>は Ni<sub>3</sub>TeO<sub>6</sub>型結晶構造をとり、転移温度 42 K 以下 で Mn<sup>2+</sup>と Sc<sup>3+</sup>の disorder によるフェリ磁性が発現する[4]。しかしこれらの報告は多結晶 体を用いたものであるため、詳細な磁気異方性は測定されておらず、また電気磁気効果の 有無も判明していない。本研究では Ni<sub>2</sub>InSbO<sub>6</sub>の Ni サイトにさらに Mn<sup>2+</sup>をドープした Ni<sub>2-x</sub>Mn<sub>x</sub>InSbO<sub>6</sub>の単結晶育成を試み、その磁気異方性を明らかにすると共に、電気磁気効 果の測定を行った。また、Mn<sup>2+</sup>ドープの効果により生じる螺旋磁気秩序の変調について考 察をする。

[1] T. Kimura, et al., Nature 426, 55-58 (2003).

[2] I. Kézsmárki, et al., Nat. Mater. 14, 1116-1122 (2015).

[3] S.A. Ivanov, et al., Chem. Mater. 25, 935-945 (2013).

[4] E. Solana-Madruga, et al., Dalton Trans. 44, 20441-20448 (2015).

#### カイラル立方晶 LaIrSiのフェルミ面上のスピン構造

# 神戸大学大学院 理学研究科 物理学専攻 量子物性論研究室 小宮 亮, 舩島 洋紀, 播磨 尚朝 Spin structure on Fermi surface of LaIrSi with chiral cubic symmetry Department of Physics, Kobe University Ryo Komiya, Hiroki Funashima, and Hisatomo Harima

#### Keywords:バンド計算,空間反転対称性,スピン軌道相互作用

空間反転対称性が存在しない物質は、非磁性状態でも電子状態がスピン自由度で分裂す るが、その場合のフェルミ面上のスピン構造は、あまり調べられていない。その一例とし て、LaIrSiのフェルミ面上のスピン構造を調べる。

LaIrSi の空間群は  $P2_13$  (No.198,  $T^4$ ) であり [1],結晶構造に鏡映対称性がなく、空間反 転対称性も存在しない。また、この物質は、鏡映対称性がないために、カイラル構造とな る。この物質について、局所密度近似をもちいた FLAPW 法によるバンド計算を行い、バ ンド図とフェルミ面、ド・ハース–ファン・アルフェン (dHvA) 振動数の角度依存性、ス ピン構造の描画を行った。

一般に、空間反転対称性がない物質では、スピン自由度に対応する縮退が解ける。LaIrSi では、Irの大きなスピン軌道相互作用を反映して、それが顕著になる。今回もとめたフェ ルミ面のうち、大きなフェルミ面ふたつを選んで、図1に示す。スピン自由度に対応する 縮退が解け、類似した一対のフェルミ面ができている。このように、LaIrSiも空間反転対 称性がないので、縮退が解けることがわかる。

図2はスピン構造である。 $k_x \ge 0, k_y \ge 0$ の領域が既約ゾーンで、 $\Delta$ 軸に関して鏡映対称性があるが、主軸に対する4回回転軸は存在しない。







図 1: バンド 129th と 130th のフェルミ面

図 2: バンド 129th の (001) 面のスピン構造

[1] B. Chevailer, P. Lejay, and et al. : Solid State Commun 41 (1982) 801.

#### カイラル結晶における自然円二色性とその角度依存性

#### 阪大産研<sup>A</sup>、物財機構 MI<sup>2</sup>I<sup>B</sup>

勝本啓資<sup>A</sup>,藤井将<sup>B</sup>,小口多美夫<sup>A,B</sup>

X-ray Natural Circular Dichroism in Chiral Crystal and the Angular

#### Dependence

#### <sup>A</sup>ISIR, <sup>B</sup>NIMS MI<sup>2</sup>I

Hiroshi Katsumoto<sup>A</sup>, Hitoshi Fujii<sup>B</sup> and Tamio Oguchi<sup>A,B</sup>

Keywords: カイラリティ、カイラル結晶、自然円二色性、第1原理計 算

TeO<sub>2</sub>や LiIO<sub>3</sub>などのカイラルな空間群を持つ結晶をカイラル結晶と呼ぶ。 この結晶は中心反転対称性が破れており、他の化合物に見られるような物性 とは異なる特徴を持っており、その一つが X 線領域における自然円二色性 (XNCD; X-ray Natural Circular Dichroism)である[1]。これは、円偏光 した X 線を照射した場合、ヘリシティによって光の吸収強度が異なることを 示す。その理由として、物質中の電子の遷移が電子双極子遷移と電子四極子 遷移の干渉項によるものであることが分かっている[2]。本研究では、第一原 理計算コード、HiLAPW を用いて TeO<sub>2</sub>、LiIO<sub>3</sub>の XNCD の角度依存性を計 算した。それとともに理論的な表式について議論したい。

[1] A. Rogalev *et al.*, C. R. Physique 9 (2008)
[2] Ch. Brouder, J. Phys.: Condens. Matter 2 (1990) 701

#### 強相関電子系における電子と正孔の振る舞い

#### 大阪大学基礎工学研究科物質創成専攻 松下剛,草部浩一 Behavior of electron and hole in strong correlated electron system Department of Materials Engineering Science, Graduate School of Engineering Science, Osaka University Goh Matsushita and Koichi Kusakabe

#### Keywords:励起子

• 研究内容

今回扱う物質は BiFeO<sub>3</sub> である。この物質は反強磁性をもつと言われているが、実際に、第一原理原理計算から得られた結果と論文<sup>[1]</sup>に書かれた内容から反強磁性をもつ強相関系であるとわかる。そして、タイトバインディングで得られた値から、Fe-Oの塊で一つのサイトを形成する 2 次元正方格子を考えることができる。タイトバインディングの値は物質中で電子と正孔が自由電子として振る舞った時の遷移振幅の値となっている。次に、物質が多粒子であることを考えると、電子間相互作用と電子正孔相互作用は避けて通れない。相互作用を評価するために、まず定常状態を考える。電子間相互作用は伝導帯中の電子間ではたらくものとスクリーンされたものを考え、電子正孔間相互作用は伝導帯にいる電子と価電子帯にいる正孔の間ではたらくものを考える。相互作用の値を数値計算で出すことで定常状態における相互作用をきめる。定常状態の結果から、時間発展の中で影響を与える相互作用の強度を見積もる。最後に、時間依存のシュレディンガー方程式を用いて、BiFeO<sub>3</sub>上の電子と正孔が運動する様子をシミュレーションする。そして、電子と正孔が作る波動関数の振る舞いを微小時間ごとに追跡する。

目的

量子デバイスにおける非線形光学結晶といった光を放射する電子素子を作る上で、 物質中で電子が励起され、凝集し、そして光を放射するまでの時間を制御する必要 がある。シミュレーションを通してその時間を予測し、物質設計を通してその時間 を制御する。

補足

この計算は計算回数こそ多いが、扱う容量は大きいわけではない。そのため、少数 粒子の場合に計算できることがわかっている。しかし、物質は多粒子として振る舞 うものだと考えると、粒子数を増やした場合に対しても計算できるように改善して いかなければならない。

[1] Moreau, J M, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1971, 32, 1315-1320

キラル磁性体におけるマイクロ波応答と電流効果

東京大学総合文化研究科A,產業技術総合研究所B

蒋男<sup>A</sup>,井口雄介<sup>A</sup>,新居陽一<sup>A</sup>,富岡泰秀<sup>B</sup>,小野瀬佳文<sup>A</sup>

Microwave response and current effect in a chiral magnet

<sup>A</sup>Dept. of Basic Sience, Univ. of Tokyo, <sup>B</sup>AIST

N. Jiang<sup>A</sup>, Y. Iguchi<sup>A</sup>, Y. Nii<sup>A</sup>, Y.Tomioka<sup>B</sup>, Y.Onose<sup>A</sup>

Keywords: D·M相互作用,スピン軌道相互作用,スピン分裂,電流効果

物理現象は系の対称性に強く依存し、その物質の対称性を反映した興味深い現象が起こ る。キラル磁性体のような空間反転対称性が破れた物質ではジャロシンスキー・守谷相互 作用が働き、らせん磁性相が安定になることがある。そのような相では特異な磁気共鳴が 起こる [1]。さらに、一般に空間反転対称性が破れた系では、スピン軌道相互作用によっ て伝導電子の分散関係が運動方向に対して分裂する。そのような系では、電流を流すこと で局在モーメントに磁気トルク(スピン軌道トルク)を与えることができる。近年では半 導体薄膜におけるラシュバ分裂などが盛んに研究されている [2] が、キラル磁性体ではラ シュバ型とは異なるスピン分裂が起き(図1)、磁気ダイナミクスに大きな影響を与える ことが期待される。そこで本研究では、まずキラル磁性体における特異な磁気共鳴を測定 する。さらに、スピン分裂由来の電流効果の観測を目指した。

キラルな金属磁性体として Fe0.8Co0.2Si を使用し、強磁性相での強磁性共鳴のほか、ら せん磁性相でもマイクロ波吸収を観測することに成功した。図2に7Kにおける代表的な 磁場Bでのマイクロ波吸収スペクトルを示す。吸収ピーク周波数は、0mT≦ B≦ 160mT のらせん磁性相では減少し、160mT ≤ Bの強磁性相では増加するのが観測できた。

電流効果に関しては、電流を流した際のマイクロ波応答を測定したが、有意な変化は観 測されなかった。そこでより高い電流密度を実現するために、集束イオンビームを用いて サンプルをナノ加工したが、そのデバイスでは磁気共鳴が観測されなかった。現在は共振 器デバイスを作製し、感度を上げたデバイスにおいて電流効果の観測を目指している。



図 1: キラル磁性体におけるスピン 分裂

図 2:4K における Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>Si のマイクロ波応答

15

[1] T.Schwarze *et al.*, Nature Material **14**, 478 (2015).

[2] D.Fang et al., Nature Nanotechnology 6, 413 (2011).

#### バナジウムスピネル酸化物 CoV2O4の結晶構造解析と軌道整列

阪府大院理<sup>A</sup>, JASRI<sup>B</sup> 下野聖矢<sup>A</sup>, 石橋広記<sup>A</sup>, 河口彰吾<sup>B</sup>, 久保田佳基<sup>A</sup> Crystal structure analysis and orbital order in spinel vanadate CoV<sub>2</sub>O<sub>4</sub> *Dep. of Phys. Sci., Osaka Pref. Univ.*<sup>A</sup>, JASRI<sup>B</sup>

S. Shimono<sup>A</sup>, H. Ishibashi<sup>A</sup>, S. Kawaguchi<sup>B</sup>, Y. Kubota<sup>A</sup>

#### Keywords: spinel, phase transition, orbital order

バナジウムスピネル酸化物 CoV<sub>2</sub>O<sub>4</sub> は V<sup>3+</sup>イオンに軌道自由度を持ち、 $T_1 \sim 150$  K でフェリ 磁性転移を起こすことが報告されている[1]。類縁物質の MnV<sub>2</sub>O<sub>4</sub> や FeV<sub>2</sub>O<sub>4</sub> は non-collinear な フェリ磁性転移温度以下の温度で軌道秩序を伴う構造相転移を起こすのに対し、CoV<sub>2</sub>O<sub>4</sub> は最 低温まで構造相転移は存在せず、90 K 以下において長距離的な軌道秩序が抑制された d 軌道

 $\times 10^4$ 

のグラス状態が存在すると報告された[2,3]。しかし、最近我々は、 CoV<sub>2</sub>O<sub>4</sub>多結晶・単結晶試料において、 $T_2 \sim 50$  K において比熱の異常 を伴う相転移を観測した[4]。本研究では、 $T_2$  における相転移の起源 を調べるために、放射光回折実験および磁化と比熱測定を行った。

図 1 に一次元検出器を用いた高分解能放射光粉末回折から得られた 800 反射の回折プロファイルの温度依存性を示す。T<sub>2</sub>以下の温度で立方晶から*c* < *a* の正方晶への構造相転移を示唆するピーク分裂が観測された。図 2 に単結晶試料による 311 反射(空間群 *Fd* 3*m* における基本反射)と640 反射(禁制反射)のX線回折プロファイルの温度依存性を示す。40 K以下の温度で311 反射に比べて640 反射強度が明らかに増加していることが分かる。これらの結果より、T<sub>2</sub> にお

ける比熱の異常は類縁物質と同様に軌道秩序を 伴った構造相転移により生じている可能性が示 唆される。当日は、これらの結果の詳細を 報告し、 $CoV_2O_4$ の結晶構造解析の結果を用 いて、 $V^{3+}$ の軌道状態の変化と、 $T_2$ における 相転移との相関関係について議論する。

[1] Y. Huang *et al.*, J. Phys. Condens Matter 24, 056003 (2012).

[2]D. Reig-i-Plessis *et al.*, *Phys. Rev. B* 93, 014437 (2016).
[3]R. Koborinai *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 116, 037201 (2016).
[4]S. Shimono *et al.*, *Mater. Res. Exp.* 3 066101 (2016).





#### 六方晶希土類フェライト ErFeO3 薄膜の強誘電性と磁気秩序

#### 千葉大院理 А

#### 實川 隼輔<sup>A</sup>, 野末 朋也<sup>A</sup>, 横田 紘子<sup>A</sup>

Ferroelectric and magnetic orderings of hexagonal ErFeO<sub>3</sub> thin films <sup>A</sup>Department of Physics, Chiba Univ. Shunsuke Jitsukawa<sup>A</sup>, Tomoya Nozue<sup>A</sup>, and Hiroko Yokota<sup>A</sup>

#### Keywords: マルチフェロイクス, 希土類フェライト, Multiferroics, RFeO3

複数の強的秩序が同一の相で発現する系はマルチフェロイックスとして知られている。特に、強誘電性と磁気秩序を併せ持つ物質群は、クロス相関により電場によって磁化を、磁場によって自発分極を制御することが可能であることから注目を集めている。しかしながら、強誘電性と磁気秩序を両立する上での様々な制約(*d*<sup>0</sup>問題)から、こうした物質は非常に数が限られているのが現状であった。

本研究では、この d<sup>0</sup>問題による制約を受けない系として六方晶希土類マンガナイト RMnO<sub>3</sub> 系に着目 し、より高い磁気相転移点、大きな磁化を示すことが期待される Fe 酸化物薄膜の創製及びその強誘電 性・磁気秩序発現機構の解明を目指している。

希土類フェライト RFeO3は、バルク状態では中心対称性 を持った斜方晶ペロブスカイト型構造が安定となり強誘 電性を示さないが、ナノ粒子や薄膜化することにより六方 晶系が安定化することが知られている。我々はこれまでに、 パルスレーザー堆積法を用いて六方晶 ErFeO3 薄膜を作製 し、その構造と物性の評価(誘電率測定, DE ヒステリシス 測定、磁気特性評価および Mössbauer 測定)を行ってきた。 その結果、(1)ErFeO3薄膜は c 軸配向している, (2)室温にお いて強誘電性を示す、(3)120K 以下において磁気秩序が発 達し、Fe<sup>3+</sup>イオンは面直方向に弱い強磁性を発現させるこ とが分かった<sup>[1]</sup>。また、極低温において確認された磁気異 常の原因を明らかにするため、我々は高磁場下での Mössbauer 測定、X線磁気円二色性(XMCD)測定を行った。 さらに、Fe<sup>3+</sup>イオンと希土類イオンの間での相互作用の有 無を調べるため、非磁性の希土類元素である Lu イオンで 置換した六方晶 LuFeO<sub>3</sub>薄膜を作製し、Mössbauer スペク





トルを比較した。発表では、上述の各種物性評価に対する考察等を報告する。

Hiroko Yokota, Tomoya Nozue, Shin Nakamura, Hajime Hojo, Mamoru Fukunaga, Pierre-Eymeric Janolin, Jean-Michel Kiat, Akio Fuwa, Phys. Rev. B 92, 054101 (2015)

#### $\pi$ -d 系有機導体 $\lambda$ -(BETS)<sub>2</sub>FeCl<sub>4</sub>の相転移

東邦大学大学院理学系研究科 矢作 聡汰 Phase transition of organic conductor  $\lambda$ -(BETS)<sub>2</sub>FeCl<sub>4</sub> in  $\pi$ -d system **Toho University** Sota Yahagi

#### Keywords: 含金属有機導体、π-d 電子系、磁性を伴った金属ー絶縁 体転移

**π-d**系の物質はπ電子と局在 d スピン間の相互作用によって様々な物性が 現れることが知られており、λ-(BETS)<sub>2</sub>FeCl<sub>4</sub>は、常圧、零磁場下の温度の低 下で反強磁性秩序化を伴う金属- 絶縁体転移を起こす π-d 系有機導体である。 この常圧、零磁場下での反強磁性秩序化を伴う金属-絶縁体転移の機構は未だ 明らかにされていない。

本研究では比熱の測定を用いて、その転移機構を明らかにすることを目標とし、 転移の臨界現象を詳細に明らかにするため、緩和法と DTA 法を組み合わせた新 しい測定方法に挑戦している。

λ- (BETS)<sub>2</sub>FeCl<sub>4</sub> は磁性を伴っ た金属―絶縁体転移を形成してい るが、これはπ電子が局在し、同 時に反強磁性秩序を形づくること が分かってきた。本研究では図に 示すように、のりを用いて試料に 微小の圧力をかけ、のりの量を変 え転移近傍の比熱のピークが劇的 に変化することを発見した。講演 ではこの変化を用いて転移の機構 を考察する予定である。



では同一試料でのりの量を変化させて測定した。

#### 不純物効果から見た重い電子系超伝導体 CeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>のギャップ構造

東大新領域<sup>A</sup>, University of Bristol<sup>B</sup>, Max-Planck-Inst.<sup>C</sup>, Ecole Polytechnique<sup>D</sup>, 京大理<sup>E</sup> 弘中恭平<sup>A</sup>, 竹中崇了<sup>A</sup>, 水上雄太<sup>A</sup>, J.Wilcox<sup>B</sup>, C.Putzke<sup>B</sup>, A.Carrington<sup>B</sup>, S.Seiro<sup>C</sup>, H.S.Jeevan<sup>C</sup>, C.Geibel<sup>C</sup>, M.Konczykowski<sup>D</sup>, 常盤欣文<sup>E</sup>, 松田祐司<sup>E</sup>, 芝内孝禎<sup>A</sup>

Gap symmetry of the heavy-fermion superconductor CeCu  $_2\mathrm{Si}_2$  seen from disorder effects

Dept. of Adv. Mater. Sci., Univ of Tokyo<sup>A</sup>, University of Bristol<sup>B</sup>, Max-Planck-Inst.<sup>C</sup>, Ecole Polytechnique<sup>D</sup>, Dept. of Phys., Kyoto Univ<sup>E</sup>

K.Hironaka<sup>A</sup>, T.Takenaka<sup>A</sup>, Y.Mizukami<sup>A</sup>, J.Wilcox<sup>B</sup>, C.Putzke<sup>B</sup>,

A.Carrington<sup>B</sup>, S.Seiro<sup>C</sup>, H.S.Jeevan<sup>C</sup>, C.Geibel<sup>C</sup>, M.Konczykowski<sup>D</sup>, Y.Tokiwa<sup>E</sup>, Y.Matsuda<sup>E</sup> and T.Shibauchi<sup>A</sup>

Keywords:重い電子系,超伝導,極低温,磁場侵入長

重い電子系化合物の中で CeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> は初めて超伝導を示すことが報告された物質であり、 かつ非従来型の超伝導体である。その転移温度は  $T_c \sim 0.6$  K である [1]。重い電子系の超 伝導物質 CeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> はラインノードを持つ *d* 波超伝導体であると考えられてきた。しかし、 近年の極低温比熱測定によって、零磁場下極低温では比熱の温度依存性が指数関数的な振 る舞いをし、低温で比熱の磁場依存性が線形でかつ結晶面内で磁場角度に依存しないこと が報告され、マルチバンドのフルギャップ構造である可能性が提案された [2]。

比熱測定では有効質量の大きい準粒子の寄与を敏感に反映するが、マルチバンドの系で は軽い準粒子の寄与も合わせて総合的に議論する必要がある。軽い準粒子の寄与に敏感な 測定には磁場侵入長測定がある。そこで我々はトンネルダイオード共振器 (TDO) という 機構を用いて高精度の磁場侵入長測定を行った。

また、これに加えて超伝導ギャップの符号反転の有無もギャップ構造の特定に必要な要素である。ギャップの符号反転の有無を調べるのに有効な位相敏感な測定として非磁性不純物の対破壊効果が挙げられる [3]。電子線照射によって点欠陥を導入した CeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> 試料に対して転移温度の変化と磁場侵入長を測定した。

本講演では、これらの実験結果から考えられるギャップ構造について議論する。

[1] F. Steglich *et al.*, Phys. Rev. Lett. **43**, 1892 (1979).

[2] S. Kittaka *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 067002 (2014).

[3] Y. Mizukami *et al.*, Nat. Commun. 5, 5679 (2014).

**D-2** 

#### ネマティック感受率測定による

#### 銅酸化物高温超伝導体における電子系の回転対称性の破れの検証

#### 東大新領域, 弘前大院理 A

石田 浩祐, 細井 優, 水上 雄太, 寺本 祐基<sup>A</sup>, 臼井 友洋<sup>A</sup>, 渡辺 孝夫<sup>A</sup>, 芝内 孝禎

Nematic measurement study of broken electronic rotational symmetry in high-T<sub>c</sub> cuprate superconductors

Dept. of Adv. Mat. Sci., Univ. of Tokyo, <sup>A</sup> Graduate School of Science and Technology Hirosaki Univ.

K. Ishida, S. Hosoi, Y. Mizukami, <sup>A</sup> Y. Teramoto, <sup>A</sup> T. Usui, <sup>A</sup> T. Watanabe, T. Shibauchi

#### Keywords: 高温超伝導, 電子ネマティック状態, 擬ギャップ

銅酸化物高温超伝導体は高い超伝導転移温度をもつ物質群であるが、その発現機構は発見から30年経つ今も未解明のままとなっている。高温超伝導を理解する上で鍵を握ると考えられているのが超伝導転移より高温側で出現する擬ギャップ状態である。近年、この擬ギャップ状態において電気抵抗率など輸送特性の測定からCuO2面内での異方性が報告され[1]、STMの解析結果からは擬ギャップ温度から異方性が現れることが観測されている[2]。これらの実験結果は格子系から期待される回転対称性を電子系が自発的に破る広義の電子ネマティック状態が擬ギャップ温度で実現していることを示唆するものである。この場合擬ギャップ現象は回転対称性の破れを伴う相転移であると考えられる。

今回我々はSTMにより異方性が報告されているBi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+y</sub>(BSCCO)に着目した。Biを一部Pbに置換しb軸方向の変調構造を抑制したBi<sub>2-x</sub>Pb<sub>x</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+y</sub>に対しピエゾ 素子を用いて一軸応力を加え電気抵抗率の変化を測定し、その温度依存性を調べた。これ はネマティック感受率と呼ばれる物理量であり、バルクにおける電子系の面内異方性を評 価する上で強力なプローブである。この感受率測定はこれまで鉄系超伝導体や重い電子系 において行われているが、銅酸化物系では未だ報告はない。そこで我々は新たに銅酸化物 系に対してネマティック感受率を測定し、電子系の回転対称性の破れを検証した。

本講演ではこのネマティック感受率の測定結果について詳細な議論を行う。

[1] Y. Ando et al., Phys. Rev. B 88, 137005 (2002).

- [2] M. J. Lawler *et al.*, Nature **486**, 382 (2012).
- [3] J. H. Chu et al., Science 337, 710 (2012).
- [4] S. C. Riggs et al., Nature Commun. 6, 6425 (2015).

## D-3

#### 鉄系超伝導体 FeSe の圧力下電子相図に対する化学置換効果

東大新領域 京大院理<sup>A</sup>東大物性研<sup>B</sup>

#### 新井佑基,松浦康平,水上雄太,綿重達哉<sup>A</sup>,笠原成<sup>A</sup>,上床美也<sup>B</sup>, 松田祐司<sup>A</sup>,芝内孝禎

The electronic phase diagram under pressure in FeSe substituted by S Dept. of Adv. Mat. Sci., Univ. of Tokyo, <sup>A</sup>Dept. of Phys., Kyoto Univ., <sup>B</sup>ISSP, Univ. of Tokyo

Y. Arai, K. Matsuura, Y. Mizukami, <sup>A</sup>T. Watashige, <sup>A</sup>S. Kasahara, <sup>B</sup>Y. Uwatoko, <sup>A</sup>Y. Matsuda, T. Shibauchi

#### Keywords: 鉄系超伝導体, 量子臨界点, 圧力下物性測定,化学置換

鉄系超伝導体 FeSe は常圧において90 K 程度で正方晶から直方晶への非磁性構造相転移 がおき、8 K 程度で超伝導転移する。圧力下においては超伝導転移温度が四倍近くにまで 上昇する。そして、2014 年に高品質な単結晶試料の作成の手法が確立され、それ以来興 味深い物性が報告されている。このような試料を用いた物性測定により圧力下電子相図も 確立されつつあり、これまで観測されなかったドーム状の反強磁性相の存在と、その抑制 と同時に超伝導転移温度が急激に上昇することが明らかとなった[1]。これらの圧力下に現 れる反強磁性相と高温超伝導の関係を明らかにすることは、鉄系超伝導の発現機構を解明 するための最重要課題の一つである。

上記の圧力下電子相図の更なる詳細を調べるために、新たな制御パラメータとして元素 置換を導入することは有力な手法である。そこで我々は FeSe の Se の一部を等価数元素 S によって置換した FeSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> に注目した。この FeSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> において非磁性構造相転移が抑制 される一方、圧力下で観測された超伝導転移温度の上昇や反強磁性が現れないことが報告 されている[2]。この結果はこの系における圧力と元素置換が異なる制御パラメータとして 働いていることを示唆している。したがって FeSe の圧力下における反強磁性相や超伝導 相に対する元素置換の影響を研究することで、この系における超伝導機構に対する理解を 深めることができる。

本研究では高品質な FeSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>の単結晶の圧力下電気抵抗測定を行った。講演ではこの 結果について詳細な議論をしたい。

[1] J. P. Sun et al., arXiv:1512.06951. (Nat. Commun. to be published)[2]S. Hosoi *et al.*, arXiv:1604.00184. (Proc. Natl. Acad. Sci. USA to be published)

### D-4

#### 電解質ゲートを用いた n 型銅酸化物高温超伝導体における

#### 超伝導絶縁体転移制御

#### 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻<sup>A</sup>, 理研 CEMS<sup>B</sup>

#### 松岡秀樹<sup>A</sup>,中野匡規<sup>A</sup>,打田正輝<sup>A</sup>,川崎雅司<sup>A,B</sup>,岩佐義宏<sup>A,B</sup>

#### Keywords: 実験, 銅酸化物, 高温超伝導, 電解質ゲート, EDLT

電解質ゲートは電気化学の原理で固体中のキャリア密度を制御する手法であり、固体ゲートと比較して電解質ゲートは多量のキャリアを制御できるという理由から、強相関物質の物性制御において電解質ゲートは有効な手法である。同時に、この手法は同一試料中のキャリア密度を連続的に変化させることで詳細な電子相図の構築を可能とする。

また一方で、n型銅酸化物高温超伝導体は、その種類の少なさと作製の困難さ、構造の 特異性、そして輸送特性やフェルミ面の示すエキゾチックな振る舞いによって、その電子 状態の議論が活発になされている物質である。

本研究では、この電解質ゲートを電子ドープ型銅酸化物高温超伝導体の一種である La<sub>2-x</sub>Ce<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>に適用し、電圧による転移温度の制御・超伝導絶縁体転移の実現に成功した。 発表においては、実験の結果得られた超伝導物性の制御の結果を示すとともに、それを基 にn型銅酸化物高温超伝導体 La<sub>2-x</sub>Ce<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>の電子相図を構築し、電子物性の議論を行う。

Fig1: 結晶構造





#### 鉄系超伝導体におけるフェルミ面縮小効果

#### 京都大学大学院 人間・環境学研究科 瑞慶覧 長空

#### Keywords:鉄系高温超伝導,軌道間相互作用,超伝導転移温度

鉄系超伝導体の発現機構は、従来の超伝導を説明する BCS 理論では説明できず、未だ 解明されていない。従来の超伝導体は電子格子相互作用がその機構であった。高温超伝導 は電子格子相互作用だけではない他の相互作用によって生み出されており、その相互作用 を解明することが、高温超伝導の理解にとって重要である。鉄系超伝導体はブリルアン ゾーン内に複数のフェルミ面を持つという特徴を持っており、そこから、フェルミ面のネ スティングによる、フェルミ面間の電子間相互作用が高温超伝導に寄与しているのではな いかと考えられている。この描像においては、複数フェルミ面のサイズが等しいとき、転 移温度は最大となる。実際そのような振る舞いは多くの鉄系超伝導体で見られる。しか し、その描像に当てはまらない実験事実が観測されている [1]。実験では、フェルミ面の サイズが等しい場合より、複数フェルミ面の一方が縮小、他方が拡大した状態において、 より高い転移温度を示すことが報告されている。そのような現象を理解するため本研究で は、複数のフェルミ面のサイズと転移温度の関係を計算し、フェルミ面のサイズが異なる 場合において転移温度が上昇することを示した。

初めに本研究で用いたモデルと計算について説明する。既に述べたように、鉄系超伝導 体は複数フェルミ面間の相互作用が高温超伝導において重要だと考えられている。そこで 本研究ではブリルアンゾーンに二つのフェルミ面を設定し、フェルミ面間の相互作用を取 り入れたハミルトニアンを考えた。そこからギャップ方程式を導き、それを線形化するこ とで、フェルミ面のサイズと、転移温度の関係を求めた。

続いて計算の結果を述べる。上で述べたような計算により、図1に示すような関係が得られた。図は、二つのフェルミ面が同一サイズの場合から一方を拡大し、他方を縮小した場合の転移温度の変化を示している。ここで、縦軸の単位は、フェルミ面間に相互作用を考えずに計算した転移温度 T<sub>0</sub> に対する比、横軸の単位はフェルミ面の大きさを変えるパラメータの値であり、左端が同一サイズ、右端は一方が最大、他方が最小の場合を示す。このように、二つのフェルミ面が同一サイズである場合より、異なるサイズである場合のほうが転移温度が高くなることが示された。



図 1: フェルミ面のサイズの変化に対する転移温度の変化

[1] S. Iimura *et al.*, Nat. Commun. **3**, 943 (2012).

#### ー層系銅酸化物超伝導体における斥力起源二電子交換散乱強度の 増加機構

大阪大学 基礎工学研究科

寺西 慎伍, 宮尾 哲亮, 草部 浩一

Enhancement mechanism of two-particle exchange scattering in single-layer cuprate superconductors *Graduate school of engineering science,Osaka University* Shingo Teranishi, Satoaki Miyao and Koichi Kusakabe

Keywords:超伝導、銅酸化物、第一原理計算

銅酸化物超伝導体は CuO<sub>2</sub> 面と、電荷供給の役割を果たすバッファ層から構成されてお り、CuO<sub>2</sub> 面の重要性について議論されてきた。銅酸化物超伝導体における超伝導転移温 度 (以下  $T_C$  とする。)の物質依存性を説明するため、様々な理論的アプローチがなされて おり、例えば、銅の  $3d_{x^2-y^2}$  ワニエ軌道と  $3d_{3z^2-r^2}$  ワニエ軌道の混成 [1] や、CuO<sub>2</sub> 面間の 二電子ホッピング [2] が $T_C$  に与える影響について現在までに報告されている。私たちは、 超伝導転移温度の物質依存性をより理解するために、また、現在よりも $T_C$ の高い超伝導 体を設計するためバッファ層を介した二電子散乱強度の調査を行っている。

私たちはいくつかの銅酸化物超伝導体に対して一電子ホッピングの計算を行ってきた。 そのために第一原理計算パッケージ"Quantum Espresso[3]",""VASP[4]"を用い、また、得 られた電子状態の情報から、低エネルギー有効模型を構築するため"Wannier90[5]"を用い てきた。

今回の発表では、銅酸化物超伝導体に対する計算結果、用いた理論的手法などについて 議論する。



図 1: 水銀系銅酸化物超伝導体における二電子交換散乱プロセス

[1]H. Sakakibara *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 057003 (2010).

[2]K. Nishiguchi et al., Phys. Rev. B 88, 014509 (2013).

[3]P. Giannozzi et al. J. Phys.: Condens. Matter 21, 395502 (2009)

[4] The Vienna Ab initio Simulation Package(VASP) : https://www.vasp.at

[5]Wannier90 : http://www.wannier.org

#### 磁場中の擬1次元格子系における超伝導対称性

#### 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻<sup>A</sup> 福井 毅勇<sup>A</sup>

#### Pairing Symmetry in Quasi-1D Lattice with Magnetic Fields Department of Physics, The University of Tokyo<sup>A</sup> Kiyu Fukui<sup>A</sup>

#### Keywords: 超伝導、スピン揺らぎ、電荷揺らぎ

BCS 理論によれば, 超伝導は2つの電子が1重項対 (Cooper 対)を形成することで発現 するが, Cooper 対の波動関数は同一サイト内で最大の振幅を持つ.このような従来型の 超伝導は原子軌道とのアナロジーからs波超伝導と呼ばれている.強相関電子系では,強 い Coulomb 斥力のために2電子が空間的に避け合うことで異方的な Cooper 対を形成す る.代表例として銅酸化物高温超伝導体のd波超伝導が挙げられる.これらの超伝導では, Cooper 対の波動関数が周波数に対して偶関数となっている.

しかしながら, Cooper 対の波動関数が周波数 (松原周波数) について奇関数となる超伝 導(奇周波数超伝導)が近年注目を集めている. 奇周波数超伝導が実現し易い系として低 次元強相関電子系が考えられる. このような系では, 強い Coulomb 斥力を避けるために 電子同士が空間的にも時間的にも避け合って Cooper 対を形成する可能性がある. これは, Cooper 対の波動関数が松原周波数に対して奇関数であるということであり, まさに奇周 波数超伝導である. 実際, 擬1次元格子系においてスピン揺らぎにより奇周波数1重項 p 波超伝導が実現し得ることが理論的に予言されている [1]. このような擬1次元格子系の 例としては有機導体である Bechgaard 塩が挙げられる. 実際に近年, Bechgaard 塩が低磁 場では奇周波数1重項 p 波超伝導体であることを支持する実験結果が報告された [2]. し かしながら, 磁場中では偶周波数1重項 p 波と奇周波数3重項 s 波の2つの可能性が指摘 されているが, 実験ではどちらが実現しているか明らかになっていない.

我々は擬1次元強相関電子系のモデルとして磁場を Zeemann 項として取り入れた拡張 Hubbard 模型

$$\mathcal{H} = -\sum_{\langle i,j \rangle,\sigma} (t_{ij} c_{i\sigma}^{\dagger} c_{j\sigma} + \text{h.c.}) - h_z \sum_{i,\sigma} \text{sgn}(\sigma) c_{i\sigma}^{\dagger} c_{i\sigma} + U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow} + \sum_{\langle i,j \rangle} V_{ij} n_i n_j$$
(1)

から求めた超伝導ギャップ関数に対する自己無撞着方程式を線形化して解くことで,パラ メータを変化させたときに最も支配的となる超伝導対称性を議論する.ペアリングの有効 相互作用は反強磁性スピン揺らぎ,電荷揺らぎを乱雑位相近似 (RPA) によって取り込む ことで求める [3]. 結果から,磁場をかけていくと Fermi 面のネスティングが悪くなること でスピン密度波 (SDW) や電荷密度波 (CDW) が抑えられることで超伝導が実現しやすく なること,また,電荷揺らぎが強いと奇周波数スピン3重項s波超伝導体が支配的となり, スピン揺らぎが強いと奇周波数スピン1重項p波超伝導に偶周波数スピン3重項成分が混 合した超伝導が起こり得ることがわかる.

- [1] K. Shigeta *et al.*, Phys. Rev. B **83**, 140509(R) (2011).
- [2] F. L. Platt *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 107005 (2013).
- [3] H. Aizawa and K. Kuroki, Phys. Rev. B 77, 144513 (2008).

#### 量子状態の断熱制御と非線形可積分系

#### 東工大 奥山真佳, 高橋和孝

#### From classical nonlinear integrable systems to quantum shortcuts to adiabaticity *Tokyo Institute of Technology* Manaka Okuyama and Kazutaka Takahashi

#### Keywords: 断熱状態, 断熱制御, adiabatic state, shortcuts to adiabaticity

本講演では量子状態の断熱制御に非線形古典可積分系の手法を適用した結果[1]について報告する。

量子系の動的制御は応用だけではなく、原理的な側面からも注目を集めており、その中 でも断熱時間発展を加速する Shortcuts to adiabaticity (STA)とよばれる方法は多くの研究が 行われている[2],[3]。この方法では、ハミルトニアンの各瞬間での固有状態が Schrödinger 方程式の厳密な解となるように、制御ハミルトニアンと呼ばれる制御項を元のハミルトニ アンに付加する。これにより、任意の速度で断熱状態を保ったまま任意の時間で時間発展 を行うことが可能となり、他の状態に遷移せずに状態を制御することができる。

STA の一般論は既に確立しており、任意のハミルトニアンに対して、制御項の一般的な スペクトル表示は与えられているが[3]、個別の物理系に対する適用は2準位系など単純な 系でしか実現されていない。その原因は主に二つあり、第一に制御ハミルトニアンの演算 子形を得ることが一般には困難であるということ、第二に得られたとしても無限和や多体 相互作用項など、複雑で非現実的な形をしていることが多いということである

本講演では非線形可積分系の理論において発展してきた Lax 形式を用いることによって、一次元量子力学系と一次元量子スピン系において制御項を構成し、上述の困難を克服 出来ることを示す。

[1] M. Okuyama, K. Takahashi, arXiv :1603.01053 (2016).

[2] M. Demirplak and S. A. Rice, J. Phys. Chem. A 107, 9937(2003).

[3] M. V. Berry, J. Phys. A: Math. Theor. 42, 365303 (2009)

非平衡定常状態における量子ゆらぎ定理:可解モデルによる解析

#### 早大理工<sup>A</sup>, 成蹊大理工<sup>B</sup> 諸留昇平<sup>A</sup>, 門内隆明<sup>B</sup>, 湯浅一哉<sup>A</sup> Quantum fluctuation theorem in nonequilibrium steady state: Analysis with solvable model *Waseda Univ.<sup>A</sup>*, *Seikei Univ.<sup>B</sup>*

Shohei Morodome<sup>A</sup>, Takaaki Monnai<sup>B</sup> and Kazuya Yuasa<sup>A</sup>

## Keywords:量子ゆらぎ定理,非平衡定常状態, quantum fluctuation theorem, nonequilibrium steady state

近年,非平衡過程で成り立つ「ゆらぎ定理」が注目されている.この定理は通常,熱平 衡状態にある系にする仕事を議論するが,本研究では非平衡定常状態(NESS)においてゆ らぎ定理を議論する.可解モデルを採用し,厳密に解析する.

量子系Sが複数の熱浴と相互作用する設定を考える (図1). 熱浴は無限に大きい系として扱い, 十分時間が経つとSを通じて熱浴間に定常的にカレントが流れる NESS が実現される. 本研究では次のハミルトニアンで記述されるモデルを採用する:

$$H(t) = \Omega[a - f(t)]^{\dagger}[a - f(t)] + \sum_{\nu=1}^{M} \int d^{3}\mathbf{k} \,\omega_{k\nu} a_{\mathbf{k}\nu}^{\dagger} a_{\mathbf{k}\nu} + \lambda \sum_{\nu=1}^{M} \int d^{3}\mathbf{k} \,(u_{\mathbf{k}\nu}^{*} a^{\dagger} a_{\mathbf{k}\nu} + u_{\mathbf{k}\nu} a_{\mathbf{k}\nu}^{\dagger} a).$$

調和振動子が *M* 個のボソン場熱浴と相互作用するモデルであり, *f*(*t*) で系に操作を加える [*f*(0) = 0 とする]. これは可解モデルであり, S の自由度が関与するモードに関しては,  $A_{\omega} = c_{\omega}^* a + \sum_{\nu=1}^{M} \int d^3 \mathbf{k} \, c_{\omega,\mathbf{k}\nu}^* a_{\mathbf{k}\nu} \, \mathcal{O} \, H(0) = \int_0^\infty d\omega \, \omega A_{\omega}^{\dagger} A_{\omega} + \cdots$ と厳密に対角化できる.

この設定で、系にする仕事の分布に対する特性関数を計算すると、M = 1で熱平衡状態 から操作を加える場合にはゆらぎ定理が成立するが、M > 1で NESS の場合には成立し ないことがわかった.これに対し、エネルギーとは異なる次の物理量に注目した:

$$X = \int_0^\infty d\omega \, x(\omega) A_\omega^{\dagger} A_\omega, \qquad x(\omega) = \ln \frac{\Gamma_\beta(\omega) + \Gamma(\omega)}{\Gamma_\beta(\omega) - \Gamma(\omega)}$$

ここで、 $\Gamma(\omega) = 2\pi \sum_{\nu=1}^{M} \int d^3 \mathbf{k} |u_{\mathbf{k}\nu}|^2 \delta(\omega - \omega_{\mathbf{k}\nu}), \Gamma_{\beta}(\omega) = 2\pi \sum_{\nu=1}^{M} \int d^3 \mathbf{k} [1 + 2n_{\nu}(\omega)] \times |u_{\mathbf{k}\nu}|^2 \delta(\omega - \omega_{\mathbf{k}\nu})$ である.この X の増加量の分布に対する特性関数は

$$\chi(\xi) = \exp\left[-\Omega^2 \int_0^\infty d\omega \left| c_\omega^* \int_0^t dt' f(t') e^{i\omega t'} \right|^2 \left\{ \frac{\Gamma_\beta(\omega)}{\Gamma(\omega)} [1 - \cos\xi x(\omega)] - i\sin\xi x(\omega) \right\} \right]$$

となり, 非平衡定常状態でも X に関してゆらぎ定理  $\chi(\xi) = \chi(-\xi + i)$  が成立する. しか も, 順方向の過程だけでゆらぎ定理が成立することがわかった.



図 1:2個の熱浴と相互作用する量子系 S

#### 小さな孤立量子系におけるETH揺らぎの普遍的な比

東大理<sup>A</sup>, 理研<sup>B</sup> 濱崎立資<sup>A</sup>, 上田正仁<sup>A,B</sup>

#### Universal Eigenstate Thermalization Fluctuations for Generic **Isolated Small Quantum Systems** Department of Physics, University of Tokyo<sup>A</sup>,

RIKEN Center for Emergent Matter Science  $(CEMS)^B$ Ryusuke Hamazaki<sup>A</sup> and Masahito Ueda<sup>A,B</sup>

#### Keywords:孤立量子系、ETH、ランダム行列、対称性、普遍性

近年の冷却原子などを用いた実験技術の発展により、外界からほとんど孤立した量子 系が実現されるようになった [1]。それに触発され、ユニタリー発展に従う非平衡ダイナ ミクスの研究が理論的にも著しく進展している。最も重要なテーマの一つとして、非平衡 な系がカノニカルアンサンブルで記述される状態に緩和するかどうか、という熱平衡化の 問題がある。熱力学極限における非可積分系では、eigenstate thermalization hypothesis (ETH)と呼ばれる機構によって、定常状態がカノニカルアンサンブルで記述されると期 待されている [2]。ETH とは、同一エネルギーシェル内で、典型的な物理量のエネルギー 固有状態で挟んだ行列要素の対角項がほぼ同じ値を持つという仮説である。同様に、非対 角項は熱力学極限で消えると期待されており、これは時間揺らぎが無視できるということ 意味する。しかし、小さな量子系ではこれらの行列要素は有限な揺らぎを持ち、これらが 従来の統計力学では理解できない非自明な有限サイズ効果を生み出す。

この発表では、対角項と非対角項の揺らぎの比が、系と物理量の対称性のみで決まる 普遍的な値になることを示す。まず、横磁場、イジング相互作用、Dzvaloshinskii-Moriva 相互作用を含み、その強さによって対称性を変化できるモデルを導入し、普遍的な比を数 値的に確かめた。次に、ランダム行列の理論を用いて、この比が系の詳細によらないもの であることを正当化した。最後に、これらの比がクエンチ後の観測量とどのように結びつ くかを議論する。我々の結果は、従来の統計力学を超えて、揺らぎに非自明な普遍性が存 在することを意味する。

[1] J. Eisert et al., Nat. Phys. **11**, 124 (2015). [2] M. Rigol et al., Nature **452**, 854 (2008).

#### 量子論における操作の両立不可能性 京都大学 濵村 一航 Quantum incompatibility *Kyoto university* Ikko Hamamura

#### Keywords : Quantum measurement, Incompatibility

量子物理学の世界で量子状態に対して実行できる操作としては物理量の測定と状態変 化がある.数学的には,量子状態はトレースが1の正作用素,物理量の測定は正作用素値 測度 (POVM,セミスペクトル測度),状態変化は完全正値トレース保存線型写像 (CPTP 写像)を用いて表される.古典論では複数のこれらの操作を同時に行なうことができるが, 量子論では Heisenberg の不確定性原理や Bohr の相補性原理で表されるように複数の操作 を同時にできない場合がある.これを 操作の両立不可能性 という.先に述べたように操 作としては測定と状態変化の二種類の操作があるので,それらの組み合わせから二つの 操作の同時操作は三通りある.すなわち,測定と測定 (図1),状態変化と状態変化 (図2), 測定と状態変化 (図3) の3 通りがある.もちろん,三つ以上の同時操作についても考える ことが出来るが,ここでは扱わない.関心があるのはどのような操作と操作が両立可能 かあるいは不可能かということである.量子論に特有の操作の両立不可能性は量子論の 基礎だけでなく,量子暗号の安全性の根拠である情報擾乱定理や量子状態の複製禁止定理 [1,2] に繋がるため,量子情報技術への応用においても非常に重要である.

本講演では、この両立不可能性についてのレビューを行なう.特に、非可換な物理量の 測定、No-cloning 定理の一般化である No-broadcasting 定理 [3]、量子測定で情報を取得す る際に擾乱が生じるという情報擾乱定理について扱う予定である.また、状態識別能力と 擾乱の関係に関する詳細な議論はポスターセッションにおいて行なう.



図 1: 物理量の同時測定

図 2: 同時状態変化

図 3: 測定過程(測定と状態 変化を同時に行なうもの)

#### 参考文献

- [1] W. K. Wootters and W. H. Zurek, Nature **299**, 802 (1982).
- [2] D. Dieks, Physics Letters A 92, 271 (1982).
- [3] H. Barnum, J. Barrett, M. Leifer, and A. Wilce, Phys. Rev. Lett. 99, 240501 (2007).

#### 環境のノイズ下における量子アニーリングの計算時間

#### 東工大理

#### 高田珠武己, 西森秀稔

#### Computation time of quantum annealing under environmental noise

#### Department of Physics, Tokyo Institute of Technology Kabuki Takada and Hidetoshi Nishimori

#### Keywords:相転移,臨界現象,散逸,量子アニーリング

我々は量子アニーリングの計算時間に環境のノイズが及ぼす影響を調べた.

量子アニーリング [1] とは最適化問題を解くための手法である.最適化問題は与えられ た目的関数を最小化する引数を求める問題であり,人工知能への応用といった実用的な側 面から重要である.しかし,効率的に解くことは非常に困難である.量子アニーリングで は,初めに最適化問題を Ising 模型の基底状態探索問題に帰着させる.そして,Ising 模 型に大きな横磁場を加えて徐々に減らすことで,最終的に系が Ising 模型の基底状態に達 することを目指す.この量子アニーリングは近年実装されたが [2],現実の量子アニーリ ングは常に環境との相互作用によるノイズ下で行われる.我々は量子アニーリングに必要 な計算時間が環境のノイズによってどのように変わるのかに着目した.

量子アニーリングの計算時間は,系の相転移を調べることによって見積もることができ る.相転移の次数が2次の場合,計算時間の発散は系のサイズに関して冪的となるが,1 次相転移なら計算時間は指数発散することが知られている.一方,スピン系が環境と相 互作用する様子は,環境をボソン系で表したスピン・ボソン模型によって表すことができ る[3].したがって,スピン・ボソン模型の相転移を解析することにより,環境との相互 作用が計算時間に及ぼす影響を求められる.

我々はスピン・ボソン模型として,最近接相互作用横磁場 Ising 模型がボソン環境と相 互作用した模型を考え,相転移・臨界現象を解析した.その結果,環境のノイズ下での量 子アニーリングの計算時間はサイズの冪であり,ノイズなしの場合の2乗程度となるこ とがわかった.これから,環境のノイズが量子アニーリングの計算時間にもたらす影響が 深刻でないことが示唆される.

- [1] T. Kadowaki and H. Nishimori, Phys. Rev. E 58, 5355 (1998).
- [2] M. W. Johnson *et al.*, Nature **473**, 194 (2011).
- [3] A. J. Leggett *et al.*, Rev. Mod. Phys. **59**, 1 (1987).

#### 熱揺らぎを用いたスピングラス基底状態の復元

東工大理<sup>A</sup>, テキサス A&M 大学<sup>B</sup> 西村光嗣<sup>A</sup>, 西森秀稔<sup>A</sup>, Andrew J. Ochoa<sup>B</sup>, Helmut G. Katzgraber<sup>B</sup>

Retrieving the ground state of spin glasses using thermal noise <sup>A</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>B</sup>Texas A&M University Kohji Nishimura<sup>A</sup>, Hidetoshi Nishimori<sup>A</sup>, Andrew J. Ochoa<sup>B</sup>, and Helmut G. Katzgraber<sup>B</sup>

#### Keywords: 統計力学, スピングラス, 量子アニーリング Statistical mechanics, Spin glasses, Quantum Annealing

近年,組み合わせ最適化問題と呼ばれる種類の問題を効率良く解くことに対する需要が高 まっている.組み合わせ最適化問題とは与えられたコスト関数を最小にするような解を見 つけ出す問題であり,有名なものとしては「巡回セールスマン問題」などがあげられる. この種の問題は極めて広範な応用を持っているため,現代社会にとって非常に意義のある 研究の1つである.

統計力学の観点から,組み合わせ最適化問題を解くことは,場所毎に異なる相互作用係 数を持つイジング模型ハミルトニアンの基底状態を求める問題と等価であることが知ら れており,この基底状態を求める手法の一つに量子アニーリング[1]がある.この手法は系 に量子揺らぎを加えることによりハミルトニアンの基底状態を求めるというものであり, 熱揺らぎを利用して基底状態を求める手法であるシミュレーテッドアニーリングに対し て計算時間の観点で優位性があることが知られている.また,近年では量子アニーリング そのものを超電導素子を利用して実際の物理系で実現するデバイスも登場しており,ある 条件のもとでは従来のコンピューターの性能を大幅に上回るという結果も報告されるな ど,賑わいを見せる分野である.

しかしながら、このようなデバイスにおいて、デバイス自身に付随するノイズの影響で 最適化問題の真の解が正しく得られない場合があることが報告されている.そのためノイ ズ下でも正しい基底状態を得られるための工夫が課題となっている.我々はスピングラス と誤り訂正符号に関連する先行研究[2]を参考に、系に熱揺らぎを加えることにより本来の 基底状態をより復元する手法を提案する.

[1] T. Kadowaki and H. Nishimori: Phys. Rev. E 58 (1998) 5355.

[2] P. Ruján: Phys. Rev. Lett. 70 (1993) 2968.

細胞動力学で見るネマチックな集団運動

東京大学大学院 理学系研究科 А

#### 上道 雅仁<sup>A</sup>, 佐野 雅己<sup>A</sup> Mechanical Aspect of Nematic Cell Migration Department of Science, The University of Tokyo<sup>A</sup> Masahito UWAMICHI<sup>A</sup> and Masaki SANO<sup>A</sup>

#### Keywords:ネマチック、非平衡、生物物理学

生物や気象に代表される非平衡現象は、種々の秩序を自発的に形成することで知られ る。しかしその振る舞いを記述する非平衡物理学の構築は、まだまだ発展途上で、特に 様々な現象を統一するための足掛かりが渇望されている。

自己駆動する粒子の集団運動も、非平衡現象の一つである。多く生物系の現象として知 られる集団運動は、時折ネマチックな配向秩序やトポロジカル欠陥を生じるもので、その 数理的記述は量子凝縮系と類似していると指摘されている[1]。他方、細胞の集団運動の 中には、数密度増加に応じて停滞してしまうものがあり、この停滞現象はガラス転移によ く似た力場の存在によって生じることが、力自体の測定によって分かっている[2]。

こうして示唆されている非平衡現象同士のつながりを強固にするため、ネマチックな細 胞集団運動を示す [3] 神経幹細胞の集団 (図 1) において、その力の測定を行った。今回は、 その進展について説明する。



図 1: 神経幹細胞集団。右、左上、左下と配向秩序が存在し(白矢印)、それぞれ1細胞を 黒塗りで強調してある。中央には配向場の欠陥が存在する。

[1] AU. Oza & J. Dunkel, arXiv:1507.01055 (2015).
[2] TE. Angelini *et al. PNAS* 108, 4714 (2011).
[3] K. Kawaguchi, R. Kageyama & M. Sano, arXiv:1605.06470 (2016).

#### 力学系モデルにおける多様性の形成

#### 東京大学大学院総合文化研究科 西浦 直人 Biodiversity in dynamical systems Department of Basic Science University of Tokyo Naoto Nishiura

#### Keywords:力学系,種分化,多樣性,表現型可塑性

生命において多様性は細胞から生態系まであらゆる階層にみられる性質である。生物 多様性の仕組みを解き明かすことは進化生物学や生態学が目指す大きなゴールとなって いる。生物を増殖する系と見たとき、生命を維持する上で多様性は生命システムの原因と 結果のどちらであるのかに決定的な答えは出ていない。生命を構成する多種の要素(細胞 内の化学成分、細胞、個体等)が安定的に共存するには最適応者が他の要素を圧倒しない (ひとり勝ちを許さない)ような仕組みが必要とされ、このような観点から生態学では多 様性と安定性の議論が長らく行われてきた[1]。また、近年、表現系可塑性(生物が発生 過程において同一遺伝子から多様な表現系を発現する能力)と多様性や種分化の関係が注 目されている[2]。

生命という多数の状態を含む系を扱う物理学的枠組みとして状態空間上の時間発展を記述する力学系によるアプローチがある。非線形素子を組み合わせた結合力学系研究の発展によって安定状態が要素間の相互作用により不安定化し複数の安定状態へと移行するような現象が様々な系で見つかった [3][4]。このような結合力学系を細胞に当てはめ細胞の多様性つまりは細胞分化機構の説明するモデルが提示されている [4][5][6]。

今回の発表では細胞や種の多様性の起源について発生過程において相互作用を取り入れた (表現系可塑性を有した)結合力学系の先行研究 [6] を踏まえて要素間相互作用を本質とする分化機構での多種共存状態を議論したい。

- [1] R.M.May, Nature **238**, 413-414 (1972).
- [2] D.W.Pfennig, et al., Trends Ecol Evol. 25, 459-467(2010).
- [3] K.Kaneko and T.Yomo, J.Ther.Biol.**199**, 243 (1999).
- [4] C.Furusawa and K.Kaneko, J.Theor.209,395(2001).
- [5] N.Suzuki, C.Furusawa, and K.Kaneko PLos ONE 6, e27232 (2011).
- [6] Y.Goto and K.Kaneko, Phys.Rev.E 88, 032718 (2013).

#### 擬似的再帰を用いた大局結合写像の不安定性解析解析

#### 東京工業大学 理学院

清水 太朗, 竹内 一将

#### Measurement of the Lyapunov exponents of GCM with pseudo reccrence Department of Physics, Tokyo Institute of Technology Taro Shimizu and Kazumasa A. Takeuchi

#### Keywords: カオス, 非線形力学系, Chaos, Nonlinear System

カオスとは、決定論的な系であるが初期条件鋭敏性を持つために、長期的な挙動の振る 舞いを予測することが困難である現象である。定量的には次のように定義される。初期条 件として、ある点 x(0)とその点に対する摂動 δ x(0)を与える。時間発展したこれら 2 点間 の距離は指数関数的に増大する。初期条件に対する摂動の指数関数的な成長率を Lyapunov 指数と定義する。したがって、系がカオスであるとは Lyapunov 指数が正であると言い換 えることができる。カオスはこれまでに天体の運動、気象モデル、蛇口から滴る水の周期 など、様々な分野において理論と実験の両面からその存在が確認されている。先行研究と して、少数自由度カオス実験系においては Lyapunov 指数の測定手法が確立されている。

一方、大自由度カオス実験系では大自由度に起因する困 難があるために、現在までに有用な測定方法は確立され ていない。

本研究では、大自由度カオス実験系でのLyapunov指 数測定の手法開発の準備として、数値シミュレーション で大自由度カオス系のLyapunov指数を算出する手法開



発に取り組んだ。対象とする系には、大自由度カオス系として知られている大域結合写像 (GCM)[2]を採用した。この系に対して、本研究で提唱する擬似的な再帰を導入し Lyapunov 指数を算出することを試みた。

[1] M. Sano and Y.Sawada , Phys. Rev. Lett {55}, 1082 (1985).

[2] K. Kaneko, Physica D {86}, 158 (1995).

#### 層流-乱流遷移におけるパターン形成ダイナミクス

## 京都大学大学院理学研究科 数学·数理解析専攻 数理解析系石川 寿雄

#### Pattern Formation Dynamics in Laminar-Turbulent Transition Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto Univ. Toshio Ishikawa

#### Keywords:流体力学 (fluid dynamics), 層流-乱流遷移 (laminarturbulent transition), 反応拡散系 (reaction diffusion system), 数 理モデル (mathematical modeling), 力学系 (dynamical system)

一般に流体は, 遅い整った流れ (層流) と速い乱れた流れ (乱流) の2つの表情を持つ. 層流-乱流遷移はこれらの表情の変化である. 円管中の流れでは, 層流の中にパフと呼ばれ る局所的な乱流領域が現れる. Reynolds 数 *Re* (流れの速さを表す量) が小さいときパフ は高い確率で減衰 (層流に戻ること) し, *Re* が大きいとき高い確率で分裂する. この性質 により, *Re* の値によってパフは異なる乱流パターンを形成する.

一方,局所的なパターンが分裂を起こす反応拡散系のモデルが知られている.このモデルの分裂の機構は力学系の言葉を用いて説明された.具体的には次のようなストーリーである:

- (1) モデル方程式は局所的なパターンの個数それぞれに対応する定常に近い解を持つ.
- (2) 定常に近い解に長時間滞在した後,別の定常に近い解に遷移する.この遷移は局所 パターンの個数の変化として観測される.
- (3) 遷移の性質は定常に近い解の力学系的な性質(相空間での不安定方向と別の定常に近い解との位置関係)によって決定される.

すなわち,定常に近い解を求めてその力学系としての性質を解析することで,パターン形 成ダイナミクスを理解することができる.

反応拡散系における局所パターンの分裂は,円管内の流れのパフが成す乱流パターンの 振る舞いと多くの共通点を持つ.このことから,円管内の流れの乱流パターンの振る舞い が同様のストーリーによって説明されることが期待される.しかし,上記のような解析を Navier-Stokes 方程式による数値シミュレーションに適用するには,計算コストがあまり に大きすぎるという問題点がある.

Barkley [1] はパフの減衰や分裂の振る舞いを定量的に表すモデルを構成している. 第 ーステップとして, このモデルに対して局所パターンの分裂のストーリーを適用すること を試みる.本講演では Barkley のモデルに対する上記の解析の実行について議論し, 今後 の可能性と限界について論じる.

[1] D. Barkley, Simplifying the complexity of pipe flow, Phys. Rev. E 84, 016309 (2011).

#### ピストン系のストキャスティック熱力学

北京大理<sup>A</sup>,東大理<sup>B</sup>,清華大理<sup>C</sup>, CICQM<sup>D</sup> 龔宗平<sup>A,B</sup>, 蘭岳恒<sup>C,D</sup>, 全海涛<sup>A,D</sup> Stochastic Thermodynamics of the piston system <sup>A</sup> Peking Univ., <sup>B</sup> Univ. of Tokyo, <sup>C</sup> Tsinghua Univ., <sup>D</sup> CICQM Zongping Gong<sup>A,B</sup>, Yueheng Lan<sup>C,D</sup>, and H. T. Quan<sup>A,D</sup>

#### Keywords: 非平衡熱力学, ゆらぎ現象, ストキャスティック解析, Nonequilibrium thermodynamics, Fluctuation Penonmena, Stochastic analysis

ピストン系は間違いなく一番簡単な熱力学系の一つであり、熱力学教科書の定番模型だ と言えます[1]。少し信じがたい話かもしれませんが、最近発展した、コロイド粒子など微 小な非平衡系に注目するストキャスティック熱力学[2]の文脈では、ピストン系が殆ど議論 されていなく、代わりにブラウニアン調和振動子[3]が最も代表的な例となっています。そ の原因は、ピストンポテンシャルが特異性を持ち、解析し難いだと考えられています。こ の仕事[4]では、 座標変換のテクニックを使って、ピストン系の仕事ゆらぎを定めるファ インマン-カッツの公式を解析的に導出しました。特に、線形応答の範囲では摂動論によ って、漸近的にガウシアンな仕事分布を導きました。応用として、長時間極限で作動する ブラウニアンシラードエンジンの取り出す仕事を最大化するプロトコル、即ちピストンの バウンダリーを移動する最適な仕方を特定しました。

[1] H. B. Callen, *Thermodynamics and introduction to thermostatistics* (John Wiley Sons, New York, 1985).

- [2] K. Sekimoto, Stochastic Energetics (Springer, Berlin, 2010).
- [3] T. Speck, J. Phys. A: Math. Theo. 44, 305001 (2011).
- [4] Z. Gong, Y. Lan, and H. T. Quan, arXiv:1602.08702 (2016).

F-6

量子系の熱力学第二法則 ~クォンタムでピュアな熱浴にて~ 東京大学大学院 総合文化研究科 金子 和哉 The second law of thermodynamics for pure quantum states

The University of Tokyo, Department of Basic Science Kazuya Kaneko

Keywords:熱力学,統計力学,量子力学



#### 参考文献

- [1] E. Iyoda, K. Kaneko, and T. Sagawa, arXiv:1603.07857
- [2] K. Kaneko, E. Iyoda, and T. Sagawa, in preparation

#### 情報駆動エンジンにおける Onsager の相反関係

東大総合文化<sup>A</sup>,東工大理工<sup>B</sup>,東大工<sup>C</sup> 山本峻平<sup>A</sup>,伊藤創祐<sup>B</sup>,白石直人<sup>A</sup>,沙川貴大<sup>C</sup> Linear Irreversible Thermodynamics and Onsager Reciprocity for Information-driven Engines Dept. of Basic Sci. Univ. of Tokyo<sup>A</sup>, Dept. of Phys. Tokyo Inst. of Tech.<sup>B</sup>, Dept of App. Phys. Univ. of Tokyo<sup>C</sup> Shumpei yamamoto<sup>A</sup>, Sosuke Ito<sup>B</sup>, Naoto Shiraishi <sup>A</sup> and Takahiro Sagawa<sup>C</sup>

#### Keywords:情報熱力学,線形非平衡熱力学

熱力学第二法則と情報理論との関係は 19 世紀から議論されてきた. 「Maxwell デーモンのパラドックス」と呼ばれる思考実験によると, 確率的なシステムの状態を測定し, その結果に応じて制御を行う「デーモン」が存在するとき, 一見すると第二法則に反する操作が可能となってしまう. この問題を端緒とし熱力学と情報理論の融合を行った, 情報熱力学と呼ばれる分野が近年盛んに研究されている [1]. その結果, 相互情報量と呼ばれる, 2つの確率的システムの相関を表す量が情報理論のみならず物理学においても重要な役割を果たすことが理解された. すなわち, 情報のやりとりがある状況においては熱力学第二法則は相互情報量変化を含めた形で成立する. 概略すれば, 正の相互情報量変化を生み出すにはそれを補償するエントロピー生成が必要であり, 逆に相互情報量を「消費」することによって, 部分系のエントロピーを減らす操作も可能となる. このように「パラドックス」は情報熱力学の成立として解決をみたが, 理論上・応用上の興味から拡張が進められている. 特に系が外部からの操作なしに自律的に情報をやり取りするような状況への拡張 [2] は生体内情報処理コストの解析等に応用可能であると期待されている.

Onsager によって確立された線形非平衡熱力学 [3] によれば, 系の熱力学は系にかかる 熱力学的力 (温度差, 電位差など) および共役な流れ (熱流, 電流など) で記述できる. 例え ば温度差と電位差が掛かっている系において, 温度差による電流の駆動, 及び電位差によ る熱流の駆動が起きることはゼーベック効果, ペルティエ効果などとして知られているが, それらの交差係数, つまり一方の熱力学的力による他方の流れの線形応答係数が等しいこ とが理論的に証明できる. これは熱力学的力に依らず普遍的に成り立ち, Onsager の相反 関係と呼ぶ. このような線形非平衡熱力学の枠組みを, 情報を含む形に拡張することは未 解決の問題であった. 我々は情報駆動力とよばれる量が, 熱力学的力と同等の役割を果た すことを一般的な設定で理論的に証明した. 特に, 情報駆動力および従来の熱力学的力に よって駆動される系について, 拡張された Onsager の相反関係が成立することを示した. これにより我々は情報処理過程の線形非平衡熱力学というべき新たな理論を構築した [4]. 分科会では証明の詳細には立ち入らず, 4 状態情報駆動エンジンとよばれるミニマルモデ ルについて概略を説明する.

- [1] JMR. Parrondo, JM. Horowitz, T. Sagawa, Nature Physics 17, 045012(2015).
- [2] JM. Horowitz, M. Esposito, Phys. Rev. X 4, 031015 (2014).
- [3] L. Onsager, Phys. Rev. 37, 405 (1931).
- [4] http://arxiv.org/abs/1604.07988