

物性研だより

# BUSSEIKEN DAYORI

第58巻

第3号

2018年10月

室内発生世界最高磁場1200テスラの記録

強磁場から見たトポロジカルなスピン構造が織りなす  
創発磁気モノポール物性

軟X線で決定する物質のバンドトポロジー  
-トポロジーは見かけより中身が大事-

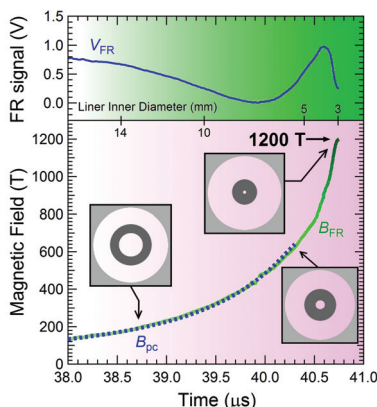
Topological superconductivity in iron-based superconductors

平衡状態の量子もつれが示す普遍的な法則

バルク結晶と薄膜結晶で異なるスピン状態を直接観測  
～スピン状態の判別に有効な計測手法を確立～

プラズモン励起で測る量子ホール効果のエッジ状態

固体結晶からの高次高調波発生 of 偏光分解測定  
～高調波の偏光に電子状態の異方性が映し出されることを実証～



東京大学 物性研究所

THE INSTITUTE FOR SOLID STATE PHYSICS  
THE UNIVERSITY OF TOKYO

Copyright ©2018 Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo. All rights Reserved.

ISSN 0385-9843

contents

- 1 室内発生世界最高磁場 1200 テスラの記録 嶽山 正二郎

---

  - 4 強磁場から見たトポロジカルなスピン構造が織りなす創発磁気モノポール物性  
金澤 直也、藤代 有絵子、十倉 好紀、三宅 厚志、三田村 裕幸、徳永 将史

---

  - 7 軟 X 線で決定する物質のバンドトポロジー  
— トポロジーは見かけより中身が大事 — 黒田 健太、近藤 猛

---

  - 9 Topological superconductivity in iron-based superconductors ZHANG Peng, 辛 埜

---

  - 11 平衡状態の量子もつれが示す普遍的な法則 杉浦 祥、中川 裕也、藤田 浩之、渡邊 正隆

---

  - 14 バルク結晶と薄膜結晶で異なるスピン状態を直接観測  
～スピン状態の判別に有効な計測手法を確立～ 横山 優一、和達 大樹

---

  - 16 プラズモン励起で測る量子ホール効果のエッジ状態 遠藤 彰、勝本 信吾

---

  - 19 固体結晶からの高次高調波発生の偏光分解測定  
～高調波の偏光に電子状態の異方性が映し出されることを実証～ 石井 順久、板谷 治郎

---

  - 22 市村学術賞、船井学術賞を受賞して 三輪 真嗣

---

  - 24 NESMCQ18 Poster prize を受賞して 長谷川 雅大

---

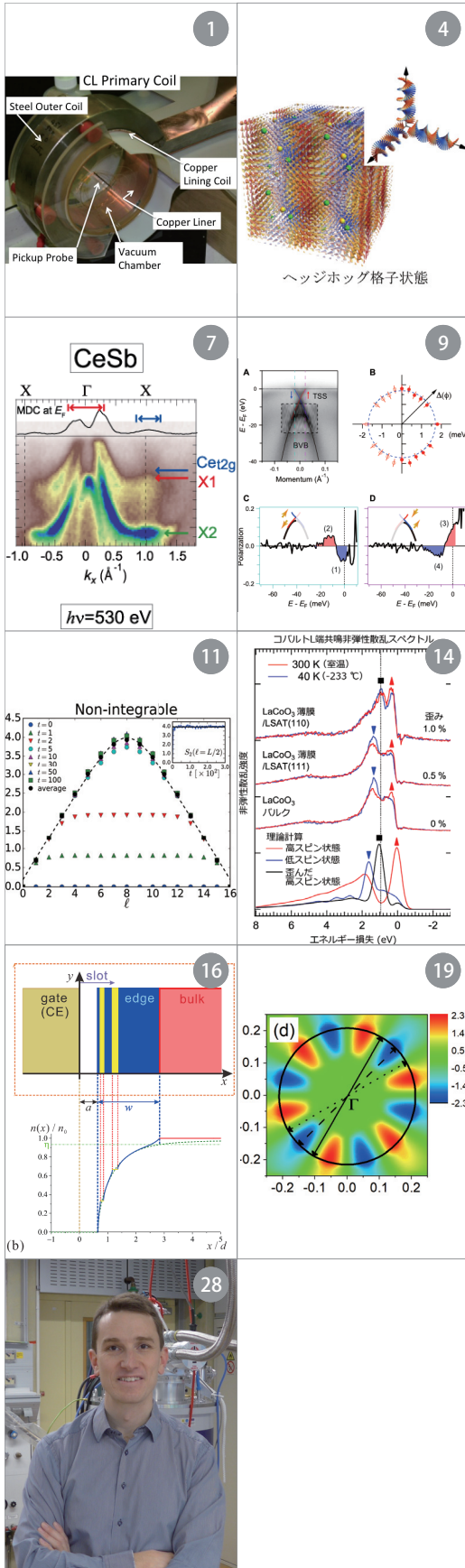
  - 26 第 11 回分子科学会奨励賞を受賞して 上田 顕

---

  - 28 外国人客員所員を経験して Clifford HICKS

---

  - 29 【物性研究所談話会】
  - 31 【物性研究所セミナー】
- 編集後記



# 室内発生世界最高磁場 1200 テスラの記録

国際超強磁場科学研究施設 嶽山 正二郎

電磁濃縮法による超強磁場発生法は半世紀にわたり物性研強磁場研究室が取り組んできた、いわば物性研強磁場のお家芸の一つである。この電磁濃縮法を用いて、ついに 1000 テスラを優に超える磁場発生に成功した。

1980 年初頭の物性研極限プロジェクトによる近角・三浦等による 1000 テスラ電磁濃縮超強磁場計画が開始されて以来、3 世代の所員により継承されて、実に半世紀が経って遂に目標に達成したことで感慨深い。電磁濃縮法による超強磁場発生は、クネール(E. Cnare, 1966 年)により提案されたもので、当時 136 kJ のコンデンサを用いて 210 T の超強磁場の発生が報告されたのが最初である。近角聡信氏が 1970 年初頭に、この方法に目を着けたのは今や先見の明があったというほか無い。

原理は極めて簡単で、ライナーと呼ばれる金属円筒リングをその円周方向に流れる電流の電磁応力を使って高速に圧縮し、比較的大きな空間(直径 10-20 cm)に予め発生させておいた数テスラの磁束を濃縮することにより、最終的に小さな空間に超強磁場を発生させる。これを信頼性と精度の高い物性計測に適用するには最低数ミリ、できれば 10 mm 程度の直径及び長さ方向の磁場発生空間と磁場均一性が必要となる。磁場発生空間の大きさとその中での磁場均一性、パルス時間の制御は必須となる。電磁濃縮法の実質的な開発と展開は世界で唯一物性研究所でのみ、超強磁場発生とこれを用いた極限的環境での物性物理学への応用研究に向けた開発を行って今日に至っている。

物性研嶽山研では、2003 年より電磁濃縮による超強磁場発生技術の開発に注力し、極めて効率のよいコイル(銅内張りコイル、以下 CL コイルという)の開発に成功した。その結果、730 T という室内発生最高磁場を大幅に記録更新した[1]。これにより、クロミウムスピネルの 600 T までの磁化過程を 5 K という極低温で精密に測定することに成功した[2]。その後、2010 年に始まった文科省最先端研究基盤事業「次世代パルス最強磁場発生装置の整備」の補助金獲得を行い、1000 テスラ級電磁濃縮超強磁場発生装置を新規導入した。その後、装置の調整と整備、開発を継続し、2018 年 1 月に全システムをほぼ完成に導くことができた。

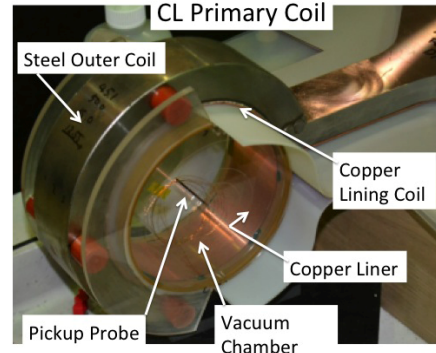


図 1. 電磁濃縮用 CL コイルとそのセッティングの様子. 外枠の鉄コイルを基準にライナー、測定プローブが高い精度で取り付けられる。

新装置では、瞬間的放電能力を引き上げるべくコンデンサ電源を刷新し、主コンデンサバンクの最大充電電圧を、旧装置の 40 kV から 50kV に引き上げた。また、コンデンサ電源と負荷である磁場発生コイルとのインピーダンス整合を最適化することで、全系のエネルギー伝達効率を改善し、大きな空間を占めるコンデンサ電源に蓄積した電気エ

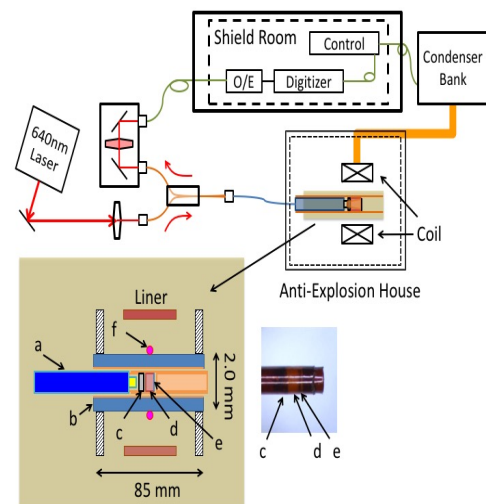


図 2. 電磁濃縮超強磁場発生時の磁場値の計測用に開発した反射型のファラデー回転プローブ. a: 光ファイバー, b: FRP チューブ, c: 偏光板, d: ファラデー素子 (石英の直径 1 mm のロッド) e: アルミミラー, f: ピックアップコイル. 640 nm 波長の半導体レーザーは、一本の光ファイバーで入射、ファラデー素子を通り反射した帰りの光は分光岐を通して検知器へ導かれる。



准教授、池田暁彦助教の忍耐強い共同作業と協力の下で達成された。これまでの電磁濃縮超強磁場発生技術開発には小嶋映二元嶽山研助教の貢献も大きいことを添えたい。

最先端事業においては、東大本部、柏地区共通事務センター、物性研事務部の多くの方々による多大な尽力に支えられた。

### 参考文献

- [1] S. Takeyama, *et al.*, J. Phys. D 44, 425003 (2011).
- [2] A. Miyata, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 107, 2072031 (2011).
- [3] D. Nakamura, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 84, 044702 (2013).
- [4] D. Nakamura, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 89, 016106 (2018).
- [5] D. Nakamura, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 89, 095106 (2018).





いうゲージ場(創発磁場)として感じとります。言い換えるとスピン構造は実効的な磁場の源とも考えられ、多種多様なスピン配列を設計できれば物質中に思い通りの強度や分布の磁場を描きだすことができるようになります。そしてMnGeに現れるヘッジホッグ・反ヘッジホッグ構造が発生する創発磁場分布は、磁束量子 $\phi_0 = h/e$ の湧出し・吸込みとなる磁気モノポールのものとなっているという訳です(図2)。

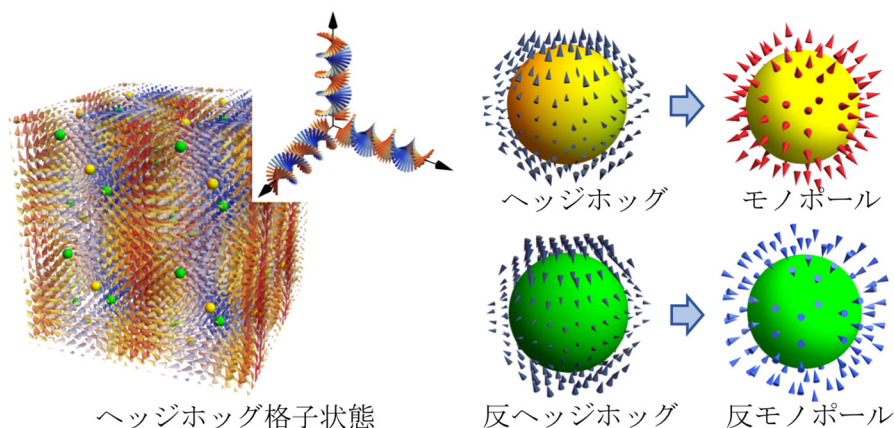


図2: 3つのらせん構造の重ね合わせで表されるヘッジホッグ格子状態(左)とそれに現れるヘッジホッグ(黄色)・反ヘッジホッグ(緑)スピン構造と対応する創発磁場分布(右)。

磁場印加によってヘッジホッグ格子が強磁性状態に転移する場合をトポロジーの観点から考えると、スピン配列を表すトポロジカル数(上記の通りスピンの向きが球面を覆う回数)に不連続変化が必ず生じることがわかります。この場合では、磁場によってヘッジホッグ(トポロジカル数+1)と反ヘッジホッグ(-1)の位置が変位し、最終的に対消滅することで非トポロジカル状態である強磁性状態(0)へと転移します。この磁場印加過程において、ヘッジホッグ・反ヘッジホッグ構造が対消滅直前で大きなゆらぎを示し、それに伴い創発磁場ダイナミクスが誘起されることが理論的に明らかとなり、実験的には数十%にのぼる大きな正の磁気抵抗効果として観測されました[5]。本実験では、

パルス強磁場下(約30 T, 10 ミリ秒幅)における高速かつ高精度抵抗測定によって、創発磁気モノポールゆらぎが低温(10 K以上)かつ強磁場(20 T以上)の極限環境においても存在し、高効率な熱-電気変換効果といった創発電磁機能の堅牢性に寄与していることを明らかにしました[9]。

ゼロ磁場の値で規格化した磁気抵抗効果の測定結果を図3に示します。カラーで示したデータは測定した抵抗率、黒い太線で示したデータは磁化(黒い細線)から見積もった

磁化が揃うことによる従来型の負の磁気抵抗効果をそれぞれ表しています。そして創発磁気モノポールのゆらぎが引き起こす電子散乱、すなわち正の磁気抵抗効果はそれら2つの差分として見積ることができます。その結果、10 K以上の温度では、強磁性転移と考えられる磁場(破線で表した磁化曲線に折れ曲がりに対応する磁場)以上の強磁場においても正の磁気抵抗効果が見られ、温度減少に伴いその効果が急激に抑制されていることがわかりました。これは、強磁場下においても、一部のヘッジホッグ構造が対消滅せず準安定状態として存在している可能性やヘッジホッグ構造といった非共線的なスピン構造が熱的に励起されていることを示唆しています。

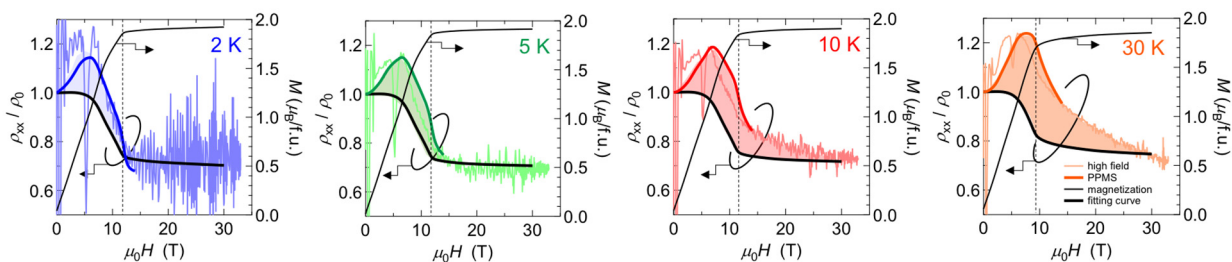


図3: 様々な温度での規格化した磁気抵抗。測定した磁気抵抗(カラー)、磁化(黒細線)、磁化から見積もった従来型の負の磁気抵抗(黒太線)、創発磁気モノポールのゆらぎがもたらす正の磁気抵抗効果(カラー網掛け)。





# 軟 X 線で決定する物質のバンドトポロジー

— トポロジーは見かけより中身が大事 —

極限コヒーレント光科学研究センター 黒田 健太、近藤 猛

## 概要：

トポロジカル絶縁体を代表とするトポロジカル物質の非自明なバンドトポロジーは、強いスピン軌道結合によって生じるバンド反転で決まる。これに伴い、結晶表面に特異な電子状態が現れることから [1]、「見かけ(表面)で中身(バルク)のトポロジーを知る」ことが可能であり、数十 eV 程度の真空紫外光を用いた表面敏感な角度分解光電子分光 (ARPES) で観測される電子状態を表面状態のバンド計算と比較して、バンドトポロジーの同定が行われてきた。しかしながら、狭ギャップ半導体や半金属などでのバンド計算では、予測される表面状態やトポロジーが計算パラメータに敏感に変化してしまうため、これまで行われてきた見かけに頼る方法では不十分であった。実際に、La モノプニクタイトや Ce モノプニクタイトなどの半金属物質では、全く矛盾した解釈が報告されており [2-4]、「見かけで中身を知る」測定ではなく、「中身を直接知る」測定が求められていた。

本研究で我々は、励起光として数百 eV 程度の軟 X 線高輝度放射光を用いたバルク敏感 ARPES を利用することで、バンドトポロジーに対する直接的な実験を Ce モノプニクタイトで実現させた [5]。この実験は、Ce モノプニクタイト物質群 (CeP, CeAs, CeSb, CeBi) のバルク電子構造の

系統的な観察に基づく。そしてプニクトゲンのスピン軌道結合効果によるバンド反転を直接観ることで、トポロジカル相図を実験的に決定するものである。これにより、見かけの測定に頼らない、バンドトポロジーを直接決定する新たな実験方法を確立した。

## 実験結果：

実験は大型放射光施設 SPring-8 の高輝度軟 X 線固体分光ビームライン BL25SU にて開発された高効率・軟 X 線 ARPES 装置を用いて行った。Ce モノプニクタイトの電子構造は、3 次元プリルアンゾーンの対称点  $\Gamma$  点にトップを持つプニクトゲン  $p$  軌道由来のホールバンドと X 点にボトムを持つ Ce  $t_{2g}$  軌道由来の電子バンドがエネルギー的に重なっており、キャリア補償型の半金属として特徴づけられる。そこで、放射光の利点である波長可変性を発揮させ、それぞれの物質で運動量対称点にあるこれらの電子構造をカットするように軟 X 線の波長を選択して ARPES 測定を行った。

図 1 に軟 X 線 ARPES で得られた半金属的なバルク電子構造の系統的な変化をまとめた。CeP から CeBi まで系統的に観察することで、プニクトゲンのスピン軌道結合がバンド構造に与える効果が見えてくる。スピン軌道結合の小

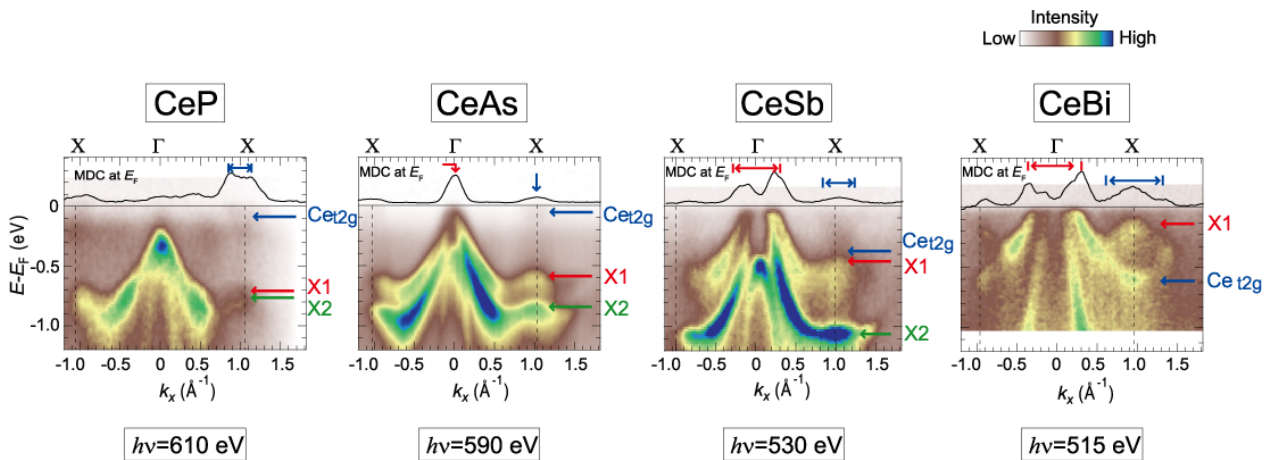


図 1：放射光軟 X 線 ARPES で観測された Ce モノプニクタイトの半金属的なバルク電子構造の系統的な変化。 $\Gamma$  点にバンドトップを持つプニクトゲン  $p$  軌道由来のホールバンドと X 点にバンドボトムを持つ Ce  $t_{2g}$  軌道由来の電子バンドが観測されている。図上にフェルミエネルギー ( $E_F$ ) での ARPES 強度の運動量分布 (MDC) をプロットした。CeSb や CeBi では、Sb と Bi の強いスピン軌道結合とキャリア補償型の半金属バンド効果により、ホールポケット(赤線矢印)と電子ポケット(青線矢印)が形成されている。



# Topological superconductivity in iron-based superconductors

Laser and Synchrotron Research Center ZHANG Peng, 辛 埴

## Introduction to Majorana modes and topological superconductors

In a topological superconductor, the opening of the superconducting gap is associated with the emergence of zero energy excitations that are their own antiparticles. These zero-energy states, generally called Majorana zero modes or Majorana bound states, have potential applications in quantum computing. Most of the proposed topological superconductors are realized with spin-helical states through proximity effect to *s*-wave superconductors. However, this approach generally requires complicated hetero-structures and a long superconducting coherence length which in principle prohibits the use of high temperature superconductors.

## Topological superconductivity in high- $T_c$ iron-based superconductors

In this work, we show that the Fe-based superconductor  $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$  single crystals host topological superconducting states at the surface, paving a distinct route for realizing topological superconductivity and Majorana bound states at higher temperatures.

$\text{Fe}(\text{Te},\text{Se})$  has the simplest crystal structure among Fe-based superconductors (Fig. 1A). First-principles calculations show that, along  $\Gamma Z$ , the  $p_z$  band has a large dispersion; near  $E_F$ , SOC causes an avoided crossing with the  $d_{xz}$  band, and a SOC gap opens (Fig. 1B). This band inversion results in a non-trivial topological invariance. Thus,  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  should host strong topological surface states near  $E_F$ . To show the predicted topological surface states clearly, we project the band structure onto the (001) surface, as shown in Fig. 1C. The Dirac-cone type surface states are located near  $E_F$ , inside the SOC gap between the bulk valence band and bulk conduction band.

Three evidences are necessary to experimentally prove

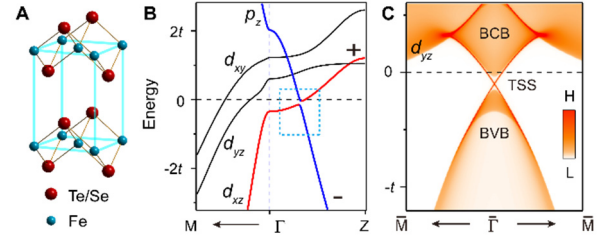


Fig. 1 (A) Crystal Structure of  $\text{Fe}(\text{Te},\text{Se})$ . (B) Bulk band structure along  $\Gamma Z$  direction. (C) Calculated (001) surface spectrum.

that  $\text{FeTe}_x\text{Se}_{1-x}$  ( $x \sim 0.5$ ) is a topological superconductor, and they are all confirmed by our high-resolution ARPES experiments:

(i) *Dirac-cone-type surface states*. The overall band structure from the high resolution ARPES is summarized in Fig. 2A. We obtained clear Dirac-cone type band together with parabola-like band. Compare with the theory calculations, we conclude that the Dirac-cone-type band is the topological surface band, and the parabolic band is the bulk valence band.

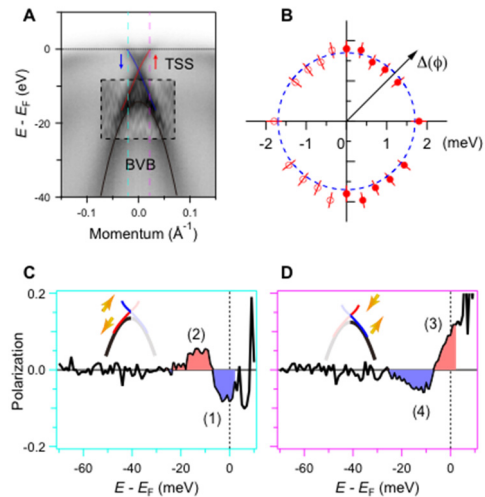


Fig. 2 (A) Intensity plot of the  $\text{Fe}(\text{Te},\text{Se})$  band structure from high-resolution ARPES measurements. (B) Polar representation of the superconducting gap size. (C-D) Spin polarization curve at the two cuts indicated in A.

(ii) *Helical spin polarization of the surface states.* Two curves at the cuts indicated in Fig. 2A were measured. The spin-resolved data show that the spin polarizations are reversed for the two cuts at the Dirac cone, whereas the background shows no spin polarization (Fig. 2CD). These data are consistent with the spin-helical texture, which is the direct consequence of “spin-momentum locking” of topological surface states.

(iii) *An s-wave superconducting gap of the surface states.* Since iron-based superconductors generally have isotropic s-wave superconducting gaps, it is natural that the surface states also open an s-wave gap, due to the proximity effect from bulk. Indeed, we observed a clear s-wave gap on the surface band, as shown in Fig. 2B.

### Majorana modes in iron-based superconductors

When the spin-polarized topological surface states open an s-wave gap, the corresponding superconducting states are topologically non-trivial. Thus, when an external magnetic field is applied, a pair of Majorana bound states is expected to appear at the two ends of the vortices. Furthermore, if a magnetic domain is deposited on the surface, destroying superconductivity within that domain, there should be itinerant Majorana modes along the domain edge. It should be fairly easy to produce

Majorana bound states and Majorana edge modes with Fe(Te,Se) single crystals. The relatively high  $T_c$  and facile growth of high-quality single crystals and thin films make Fe(Te,Se) a promising platform for studying Majorana bound states and may further advance research on quantum computing.

### References:

- [1] P. Zhang et al., Appl. Phys. Lett. 105, 172601 (2014).
- [2] Z. Wang et al., Phys. Rev. B 92, 115119 (2015).
- [3] P. Zhang et al., Science 360, 182 (2018).
- [4] P. Zhang et al, Nature Phys. 15, 41 (2019).
- [5] D. Wang et al., Science 362, 333 (2018).

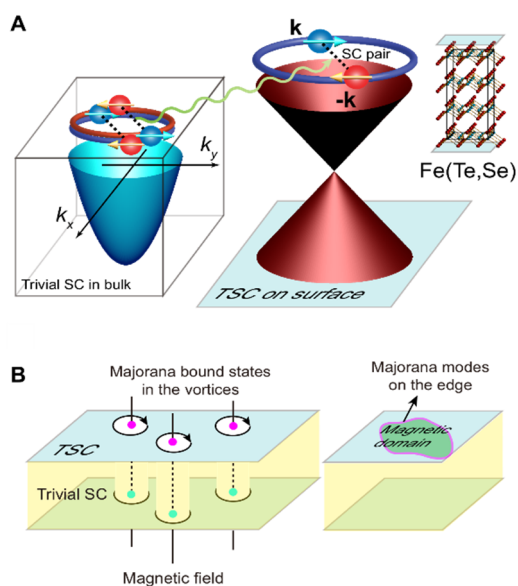


Fig. 3 (A) Topological superconductivity on the surface of FeTe<sub>0.55</sub>Se<sub>0.45</sub>. (B) Existence of Majorana bound states and itinerant modes with vortices and magnetic domains.

# 平衡状態の量子もつれが示す普遍的な法則

東京大学物性研究所 杉浦 祥\*1、中川 裕也\*2、藤田 浩之  
東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 渡邊 正隆  
\*1 現：ハーバード大学 \*2 現：株式会社 QunaSys

## ①研究の背景

量子力学とは原子一つ一つのようなミクロな世界を記述する物理理論です。他方、熱力学とは金属や液体のように原子や分子が集まった物質においてマクロで普遍的な性質に着目する理論的です。物理学の根幹をなすこの2つの理論間の対応関係は、20世紀初頭の量子力学の黎明期から研究されてきました。特に、外界から切り離された環境において、量子純粋状態の性質を熱力学で予言できるかという問いは、理論的な興味はもちろん、冷却原子を使った実験との対応からも、近年重要な課題となっています。

このようなミクロとマクロの対応の研究に重要になるのが、量子もつれです[1]。量子もつれは、量子状態を2つの領域に分割した時に、その2つの間に生じる量子力学的な相関の事です。具体的には、量子力学的な重ね合わせがその2つの領域にまたがって広がっている時に生じます。量子もつれは量子力学に基づく現代物理学の様々な分野を貫く基礎的な概念です。例えば、量子系の効率的なシミュレーションや量子テレポーテーション、ブラックホールの蒸発現象など、様々な現象が量子もつれによって理解できます。

量子純粋状態を用いた熱力学では、量子もつれの量が熱力学的なエントロピーに対応します[2]。従って、熱力学エントロピーの増大によって実現する熱平衡化は、量子力学から説明すると系全体に量子もつれが広がることで起こる現象と言うことができます。

## ②研究の内容

我々のグループは、熱平衡状態を表すような量子純粋状態における量子もつれの空間分布を研究しました。量子純粋状態を空間的に二つに分けた時に、その領域間に存在する量子もつれの量(エンタングルメント・エントロピー)がどのような性質を持つかを調べました(図1)[3][4]。

まず、熱力学系との厳密な対応が確立されている量子純粋状態である canonical thermal pure quantum state (cTPQ)に基づき、エンタングルメント・エントロピーの

空間分布を表す一般的な関数を理論的に導出しました。そして孤立量子系のエネルギー固有状態と定常状態とが持つ量子もつれの空間分布に対して、我々の導出した関数が共通してよく当てはまることを、数値シミュレーションを用いて確認しました。

エネルギー固有状態は、ある意味で熱平衡状態と非常に近い事が知られています。つまり、任意のエネルギー固有状態を用いて局所的な物理量の期待値を計算すると、非可積分系と呼ばれるクラスの系において、その値が熱平衡状態と一致する値を示す事がよく確かめられています(エネルギー固有状態熱平衡化仮説、ETH と呼ばれる[2])。反対に、可積分系の場合には、固有状態を用いた期待値の値は熱平衡状態からずれを持つことも知られています。我々の数値シミュレーションでは、我々の理論が非可積分系のエネルギー固有状態の正しいエンタングルメント・エントロピーの空間分布を与え、可積分系では与えないことを示しました。つまり、ETH がエンタングルメント・エントロピーに対しても成立していることを我々は新たに示しました。

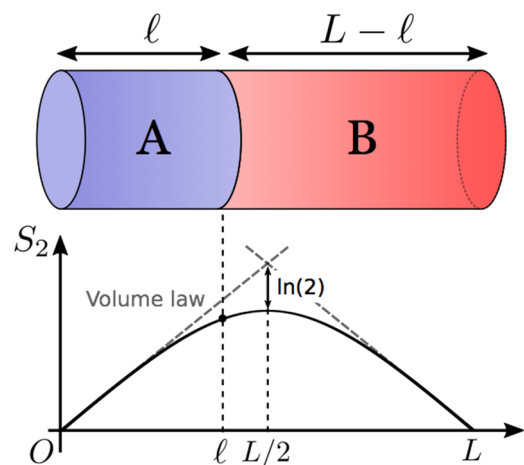


図1 量子もつれの空間分布の概念図。物質をAとBの2つに分けた時に、AとBの間にどのくらいの量子もつれが生じているかを縦軸に、物質Aの長さを横軸にプロットしてある。



能な基本的な成果であり、分野を越えた共同研究は今後さらなる成果を上げていく事が期待されます。

- [1] M. A. Nielsen, and I. L. Chuang, 2000, *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge University Press, Cambridge)
- [2] L. D'Alessio, Y. Kafri, A. Polkovnikov, and M. Rigol, *Adv. Phys.* **65**, 239 (2016).
- [3] Y.O. Nakagawa, M. Watanabe, S. Sugiura and H. Fujita, *Nature Commun.* **9** 1635 (2018).
- [4] H. Fujita, Y.O. Nakagawa, S. Sugiura, and M. Watanabe, *J. Hep.* **18**, 112 (2018).
- [5] A. M. Kaufman, M. E. Tai, A. Lukin, M. Rispoli, R. Schittko, P. M. Preiss, and M. Greiner, *Science* **353**, 794 (2016).
- [6] A. Chandran, C. R Laumann, and V.Oganesyan, *arXiv* , 1509.04285 (2015).







測定に用いた試料は、 $\text{LaCoO}_3$  のバルク単結晶と LSAT 基板上に成長させた薄膜結晶[1]である。薄膜結晶の膜厚は 30 nm で、基板の方位を変えることで異なる歪みの大きさを実現した。実験では、それぞれの試料に対してコバルトイオンの吸収スペクトル(図 1(b))と共鳴非弾性散乱スペクトルを測定した。これまでの研究からバルク結晶と薄膜結晶は異なるスピン状態であると考えられているが、吸収スペクトル形状において歪みに依存する明確な違いは見られなかった。今回得られた非弾性散乱スペクトル(図 2)ではエネルギー損失が 1 eV 付近のスペクトル形状に大きな違いが観測され、理論計算で求めたスペクトル形状と比較することでスピン状態の構成成分と割合が違うことが明らかになった。具体的には、LSAT(110)基板上ではすべてが高スピンであるが、歪みによって対称性が低くなった高スピン状態が加わっているため、高スピンと低スピンの重ね合わせで得られるほかのスペクトルとは全く違う状態となっている。このように、吸収測定では判別できなかったスピン状態を非弾性散乱測定によって明らかにすることに成功している。

- [1] J. Fujioka, Y. Yamasaki, H. Nakao, R. Kumai, Y. Murakami, M. Nakamura, M. Kawasaki, and Y. Tokura, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 027206 (2013).
- [2] Y. Harada, M. Kobayashi, H. Niwa, Y. Senba, H. Ohashi, T. Tokushima, Y. Horikawa, S. Shin, and M. Oshima, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 013116 (2012).
- [3] Y. Yokoyama, Y. Yamasaki, M. Taguchi, Y. Hirata, K. Takubo, J. Miyawaki, Y. Harada, D. Asakura, J. Fujioka, M. Nakamura, H. Daimon, M. Kawasaki, Y. Tokura, and H. Wadati, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 206402 (2018).



# プラズモン励起で測る量子ホール効果のエッジ状態

ナノスケール物性研究部門 遠藤 彰、勝本 信吾

## 1. はじめに

半導体ヘテロ接合界面やグラフェン中にできる2次元電子系に磁場を印加することにより現れる現象の中で、最もよく知られているものは量子ホール効果であろう。整数量子ホール効果は、ある磁場範囲にわたり(あるいは、磁場を固定して電子濃度を掃引する場合には、ある電子濃度範囲にわたり)、対角抵抗がゼロとなり( $R_{xx} = 0$ )、ホール抵抗が高い精度で基礎物理定数のみで決まる値となる( $R_{xy} = R_K / p$ ,  $p = 1, 2, 3, \dots$ ,  $R_K = h/e^2 = 25812.807 \Omega$ はフォン・クリッツィング定数で、電荷素量 $e$ とプランク定数 $h$ のみで決まっている)現象である。このホール抵抗値は抵抗標準として利用されているほか、微細構造定数の導出にも用いられている。この現象には、試料内部(バルク)が局在状態(絶縁体)となり、試料端にのみ、一方向にのみ電子が移動できる(すなわちカイラリティーを持つ)1次元な無散逸伝導チャンネル(エッジ状態)が形成されることが重要な役割を果たしている。エッジ状態は、後方散乱無く電荷やスピンを伝播させ得るチャンネルとしても注目され、応用を視野に入れた研究もなされている。バルクとエッジの関係が示唆する通り、整数量子ホール効果は、近年爆発的に

研究されているトポロジカル絶縁体の、最も歴史の古い一形態とみなすことも出来る。

磁場中2次元電子系の高周波での実験的研究法の一つとして、コプレーナ型導波路を用いる手法がある。コプレーナ型導波路とは同軸ケーブルを平面に切り開いたようなもので、半導体2次元電子系の基板表面に設置された導波路を伝播するマイクロ波と基板に埋もれた2次元電子系との相互作用を通して2次元電子系の情報を得る。2次元電子系は伝導率が高いほどマイクロ波を良く吸収するので、マイクロ波透過率は2次元電子系の高周波伝導率の周波数依存性の測定に用いられている[1]。マイクロ波吸収により2次元電子系が局所的に加熱されることに着目し、熱起電力の測定にも利用された[2]。また、マイクロ波照射により多体状態が励起されることから、ウィグナー結晶・バブル相・ストライプ相といった、磁場下2次元電子系バルク中に形成される、強い電子間相互作用に起因する種々の電子固体相の振動モード(ピニングモード)の研究にも用いられてきた[3]。本研究はこの手法を、量子ホールエッジ状態の研究に応用したものである[4]。

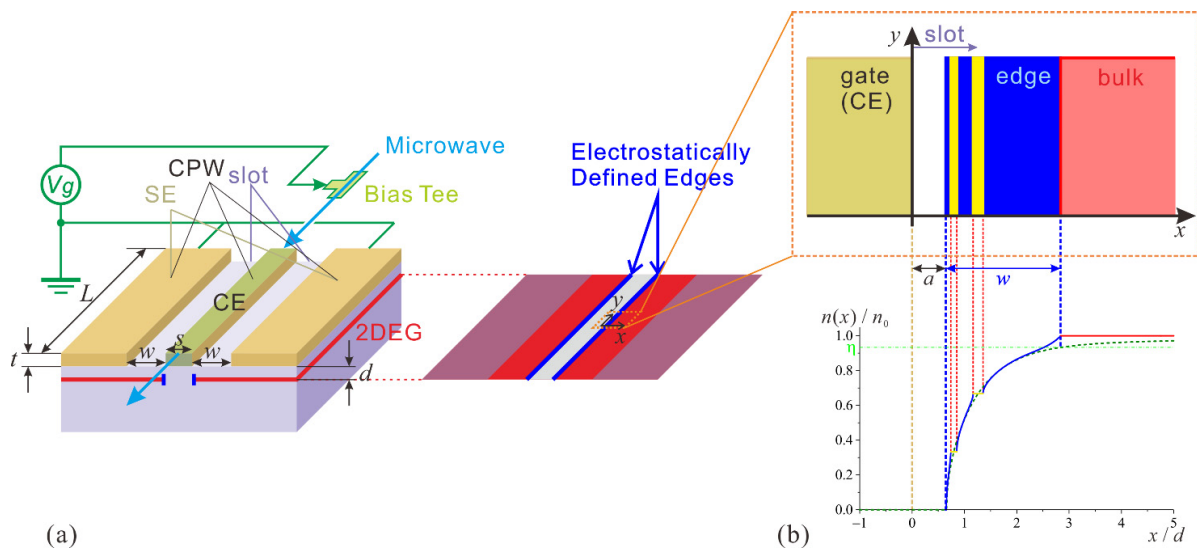


図1. (a) 試料と測定法の概略。2DEG: 2次元電子系、CPW: コプレーナ型導波路、CE: 中央電極、SE: 側電極。CEに負バイアスを印加しスロット部にエッジを導入する。マイクロ波透過率および(図示されていない)オーミック電極間に発生する熱起電力を測定する。(b) エッジ付近の拡大図。平面図(上図)と電子濃度  $n(x)$  の位置  $x$  依存性(下図)。 $a$ : 空乏長。 $w$ : エッジ状態幅。エッジ状態は交互に並ぶ圧縮性(青)・非圧縮性(黄色)の帯からなり、 $w$  は全体の幅。

## 2. 試料と実験方法

図 1(a)に試料と測定法の概略を示す。GaAs/AlGaAs ヘテロ接合界面直下に 2 次元電子系(2DEG)を含む半導体基板を用い、その表面上に電子ビームリソグラフィーを用いた微細加工技術でコプレーナ型導波路(CPW)を設置する。マイクロ波は主として CPW の中央電極(CE)と両側の接地電極(SE)との間隙部分(slot)直下の 2DEG に吸収されるので、測定はこの部分の 2DEG への感度が高い。本研究では、バイアス・ティー(Bias Tee)を経由して CE に負バイアスを印加し、すなわち CE をゲート電極としても利用し、CE 直下の電子を排除することにより静電的にエッジ状態を、高感度で測定される slot 部へ導入する。マイクロ波透過率の周波数依存性を測定することにより、エッジ状態での励起が観測できる。また、図示されていないが、2DEG に直接電氣的に接触しているオーミック電極が取り付けられており、マイクロ波吸収により発生する熱起電力の測定も可能となっている。後述するように、熱起電力からも透過率と同様の情報を、より高い感度で得ることができる。測定は、超電導マグネットを備えた希釈冷凍機中(ベース温度 $\sim 20$  mK)で行った。

## 3. 実験結果

図 2 に典型的な測定結果を示す。ランダウ準位充填率  $\nu_0 = 4$  の整数量子ホール効果での測定結果である。図 2(a) はマイクロ波透過率  $\Delta T$  を CE に印加した負バイアス  $V_g$  とマイクロ波周波数  $f$  に対してプロットしたものである。 $V_g$  印加とともに CE 直下の電子は減少し、閾値を超えると ( $V_g < -0.44$  V) 電子はいなくなり slot 部にエッジ状態が導入される。それと同時に  $\Delta T$  に明瞭なピークが観測され、更に大きな負バイアスを加えていくとピークは高周波数側に

シフトしていく。これらのピークはエッジ状態へのプラズマ振動励起である「エッジ・マグネトプラズモン」励起によるものと解釈される。一番低い周波数の基本モード  $f_0$ 、および高調波  $if_0 (i=2,3,\dots)$  が観測されている。負バイアス増加による高周波側へのシフトはプラズモンの伝播速度の増加に因るものである。伝搬速度は主として CE とエッジ状態間の静電結合の強さにより決まる。速度増加は、より負の  $V_g$  によりエッジ状態が CE から遠ざけられた(空乏長  $a$  が増加した)ことの帰結である。静電的な理論[5][6]により、本実験に用いた 2 次元電子系基板の試料パラメータを用い空乏長  $a$  やエッジ状態幅  $w$  を計算し、それらを用いさらに基本モードの周波数  $f_0$  を導出したものを図 2(a)に黄色い太線でプロットしてある。実験のピークを非常に良く再現していることがわかる。同等のエッジ・マグネトプラズモンは  $\nu_0 = 2$  から 18 までの他の整数量子ホール効果でも観測され、 $f_0$  は同様の計算ですべて良く再現出来た。充填率が大きくなると(すなわち低磁場になると)エッジ状態幅が急激に増加することが計算から予測されるが、これが実験的に裏付けられたことになる。図 2(a)をよく見ると  $-0.44$  V  $< V_g$  の領域にもピークは継続しているのが見える。CE 下の電子が完全に無くならなくても、電子濃度が異なる slot 部との境界にエッジ状態は出来、エッジ・マグネトプラズモンは励起され得る。このような状況でのエッジ・マグネトプラズモンが観測されたのは、筆者らの知る限り本研究が初めてである。この領域での  $V_g$  による  $f_0$  の微妙な増減は、CE 下が量子ホール状態(局在状態)にあるか非局在状態にあるかの違いによるスクリーニングの変化で定性的に説明できる。図 2(b)に示す熱起電力からも、基本的に図 2(a)の  $\Delta T$  と同等の情報が得られる。マイクロ波吸収の増減が直接温度勾配の増減に反映されるため、と考えられる。

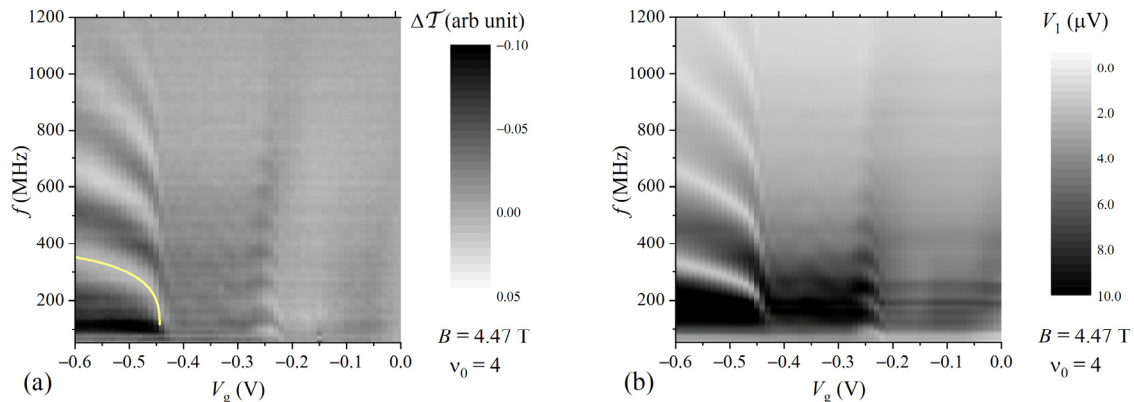


図 2. ランダウ準位充填率  $\nu_0 = 4$  整数量子ホール効果でのバイアス  $V_g$  - 周波数  $f$  依存性の測定結果。(a) マイクロ波透過率  $\Delta T$ 。黄色い太線は計算から求めたプラズモン励起周波数の  $V_g$  依存性。(b) 熱起電力  $V_1$ 。

熱起電力の測定では試料と無関係な配線等の影響を軽減できるため、ノイズやバックグラウンドが小さく、ピークがより明瞭に観察される場合が多い。

#### 4. まとめ

コプレーナ型導波路の間隙部に静電的に試料端を導入し、マイクロ波透過率、または熱起電力を測定することにより、量子ホールエッジ状態でのエッジ・マグネトプラズモンを観測できることを明らかにした。励起周波数は空乏長、エッジ状態幅に依存するため、本測定は、通常の抵抗測定では得ることのできない試料端付近のこれら特徴的長さの実験的探索を可能とし、量子ホールエッジ状態に関する基礎的な知見をもたらす手法である。プラズモンをデバイス応用するために制御する際の指針を与えることも期待される。

#### 参考文献

- [1] L. W. Engel, D. Shahar, Ç. Kurdak, and D. C. Tsui, *Phys. Rev. Lett.* **71**, 2638 (1993).
- [2] S. Kobayakawa, A. Endo, and Y. Iye, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82**, 053702 (2013).
- [3] 例えば H. Zhu, G. Sambandamurthy, L. W. Engel, D. C. Tsui, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 136804 (2009).
- [4] A. Endo, K. Koike, S. Katsumoto, and Y. Iye, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 064709 (2018).
- [5] D. B. Chklovskii, B. I. Shklovskii, and L. I. Glazman, *Phys. Rev. B* **46**, 4026 (1992).
- [6] I. A. Larkin and J. H. Davies, *Phys. Rev. B* **52**, R5535(R) (1995).

# 固体結晶からの高次高調波発生の特光分解測定

～ 高調波の特光に電子状態の異方性が映し出されることを実証 ～

極限コヒーレント光科学研究センター 石井 順久、板谷 治郎

## 研究背景

近年、極短パルスレーザー技術の発展により、フェムト(10<sup>-15</sup>)秒の持続時間を有する高強度光パルスが中赤外領域(光の波長で3-10 μmの帯域)で発生可能である。そのピーク電力は1 GWに達し、光を集光することで10 GV/m以上の電場強度が達成可能になっている。中赤外光パルスの光子エネルギーは、半導体や絶縁体のバンドギャップエネルギーに比べ十分低いため、試料を破壊することなく、数GV/m程度の高強度電場が印加可能である。この値は、直流電場による典型的な絶縁耐力である10-100 MV/mを二桁以上上回り、今までにない強電界下で、固体の応答が観測可能になりつつある。

2010年にスタンフォード大学の研究グループが、高強度電場下での固体の極端非線形応答の先駆けとなる実験を行った。高強度赤外レーザーを照射した酸化亜鉛結晶から、赤外レーザーの光周波数の25倍までの周波数成分を持つ、高次高調波と呼ばれる光放射が観測された [1]。高調波の光子エネルギーは9 eV程度まで達しており、酸化亜鉛のバンドギャップエネルギーを超えている。この実験以来、世界各地で固体高調波発生や強電場下での過渡吸収測定等

の実験が行われている。しかし、これまでの実験では、物質と光電場共に1次元的に取り扱っており、3次元の自由度を有する試料と2次元の特光状態を有する光電場の相互作用を記述するには不十分であった。本研究では、中赤外光パルスを照射したセレン化ガリウム結晶(Gallium Selenide, GaSe)からの高次高調波の特光を分解して測定した。高調波の特光状態は結晶方位に依存し、その依存性が、最も低いエネルギーの伝導帯の曲率テンソルによって記述できることを示した(物性研プレスリリース、<http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/news2.html?pid=5281>) [2]。

## 研究内容

板谷研究室で開発した波長5 μmの高強度中赤外レーザー[3]を集光し、1 GV/m程度の電場をGaSe結晶に印加した。高次高調波スペクトルを特光分解(直線特光の赤外電場に平行と直交する2成分に分解)し、その結晶方位依存性を測定した(図1)。偶数次高調波の平行・直交成分はいずれも60度の周期を呈し、奇数次高調波の場合は平行成分が60度、直交成分が30度の周期を呈することを見出した。偶数次高調波は、GaSe結晶(図2(a)参照)の反転対

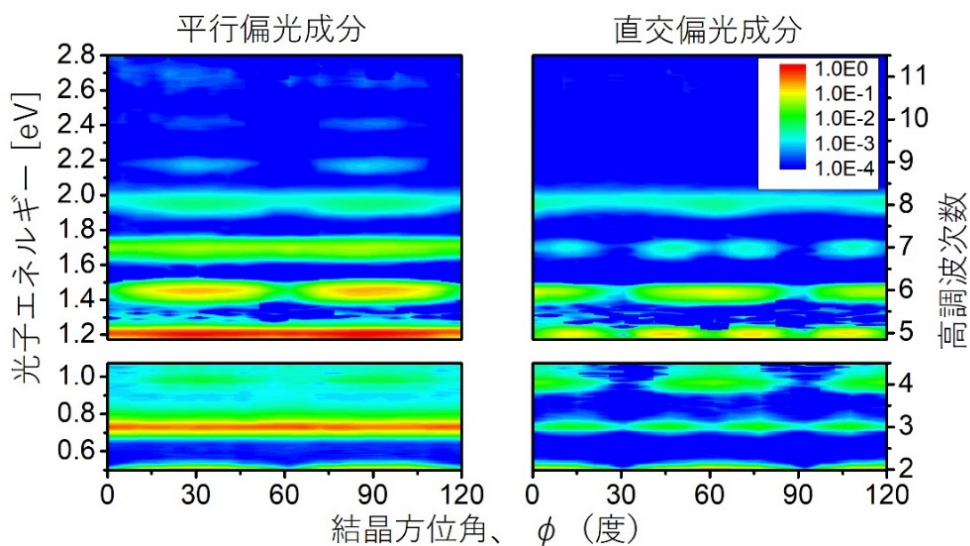


図1. 高次高調波スペクトルの特光分解測定と結晶方位依存性



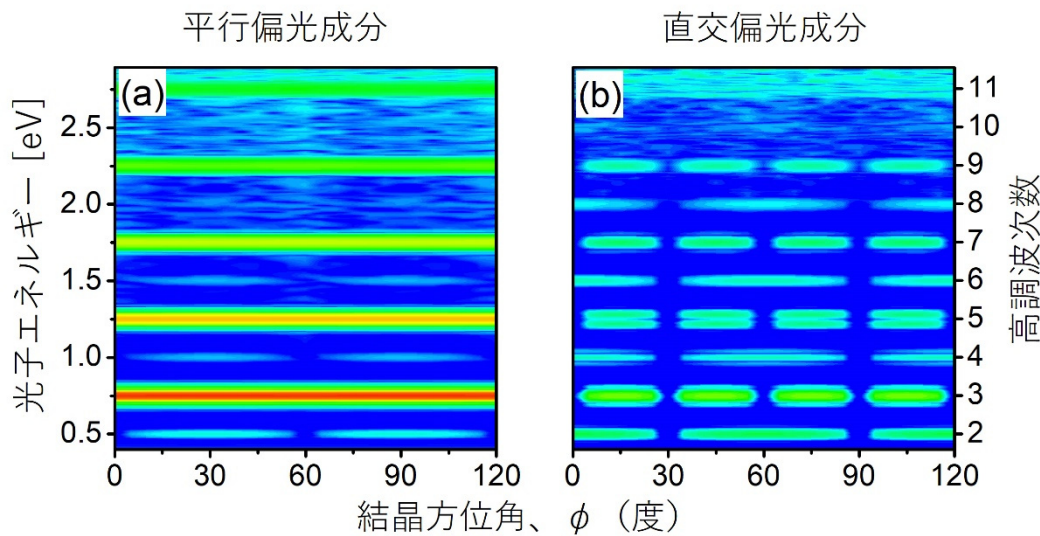


図 3. 3次元量子計算による偏光分解した高次高調波スペクトルの結晶方位角依存性

間電流のみが、奇数次高調波では両成分が寄与することが明らかになった。特に GaSe では、9 次以下の奇数次高調波でバンド内電流の寄与が強いことがわかり、前述の解析的なモデルの適応が可能であることが示された。

### まとめと展望

本研究では、高強度中赤外電場を印加された固体結晶から放射される高次高調波の 2 次元偏光状態を測定した。高次高調波の偏光状態と試料のバンド曲率の異方性を結びつきを明らかにした。将来的には、発生した高次高調波の偏光状態に加えて、時間波形を測定することにより、バンドの形状を再構築することが可能になると期待される。バンド構造決定において全光学的手法を用いることができれば、従来用いられている光電子分光を適用できない、高圧力、高磁場、高電場下の極限状態や、過渡的な状態においてもバンド構築が可能になると期待される。

### 謝辞

本研究は金島圭佑特任助教(研究当時・東京大学理学系研究科物理学専攻博士課程学生、現・北海道大学工学研究院応用物理学部門)、篠原康特任助教(東京大学工学系研究科附属光量子科学研究センター)、竹内健吾氏(研究当時・東京大学理学系研究科物理学専攻修士課程学生)、今坂光太郎氏(東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程学生)、梶智博氏(研究当時・東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修士課程学生)、芦原聡准教授(東京大学生

産研究所)、石川顕一教授(東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻)との共同研究として行われました。ここに感謝申し上げます。物性研究所の加藤岳生准教授、秋山英文教授、京都大学の田中耕一郎教授にご助言をいただきましたことを感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] S. Ghimire, A. D. DiChiara, E. Sistrunk, P. Agostini, L. F. DiMauro, and D. A. Reis, “Observation of high-order harmonic generation in a bulk crystal,” *Nature Physics* **7**, 138–141 (2010).
- [2] K. Kaneshima, Y. Shinohara, K. Takeuchi, N. Ishii, K. Imasaka, T. Kaji, S. Ashihara, K. L. Ishikawa, and J. Itatani, “Polarization-Resolved Study of High Harmonics from Bulk Semiconductors,” *Phys. Rev. Lett.* **120**, 243903 (2018).
- [3] K. Kaneshima, N. Ishii, K. Takeuchi, and J. Itatani, “Generation of carrier-envelope phase-stable mid-infrared pulses via dual-wavelength optical parametric amplification,” *Opt. Express* **24**, 8660–8665 (2016).





- [3] S. Miwa *et al.* “Voltage controlled interfacial magnetism through platinum orbits” *Nat. Commun.* **8**, 15848 (2017).
- [4] T. Kawabe *et al.*, “Electric-field-induced changes of magnetic moments and magnetocrystalline anisotropy in ultrathin cobalt films” *Phys. Rev. B* **96**, 220412(R) (2017).
- [5] S. Miwa *et al.* “Perpendicular magnetic anisotropy and its electric-field-induced change at metal-dielectric interfaces” *J. Phys. D: Appl. Phys.* **52**, 063001 (2019). [Topical Review].





を操作すれば、1回の操作で汲み上げることが出来る電子の数は1に「量子化」されるということが知られていました[2]。本研究では、任意の量子ドット模型においても「量子化」は起こるのか、という点に疑問を持ち、『「量子化」するかどうかを決める要因はなにか?』という問題の解明に挑戦しました。結果として、輸送される電子数が1に量子化されない例外的な模型を発見しました。量子ドットの電圧の壁を操作すると、ラムシフトと呼ばれるドット内の電子のエネルギー変化が発生することが知られています。このラムシフトの性質は量子ドットの外にいる多数の電子のエネルギー分散関係に強く依存しています。輸送電子数が1に「量子化」される模型では、電圧の壁を操作した際にラムシフトにより必ず量子ドット内の電子のエネルギー準位がドット外の電子のフェルミエネルギーを横切っており、そうでない模型では輸送電子数が1に「量子化」されないことを本研究は明らかにしました。

本研究は、ナノスケールの電子輸送特性に新しい知見を与えただけでなく、非平衡統計物理学の基礎づけにも有用な結果をもたらしました。今回は電流特性のみを議論しましたが、熱流に議論を拡張することで、量子性が強く現れる領域での非平衡定常熱力学の基礎を議論する理論模型を与えることになります。今後は、理論模型を拡張してゆき、より一般的な非平衡定常状態の物理について明らかにしていきたいと思います。

#### 参考文献：

- [1] D. J. Thouless, et. al., Phys. Rev. Lett. **49**, 405 (1982).
- [2] O. Entin-Wohlman, et. al. Phys. Rev. B, **65**, 195411 (2002).





- [3] “Quantum-disordered state of magnetic and electric dipoles in an organic Mott system”, M. Shimozawa, *et al.*, *Nature Commun.* **8**, 1821 (2017).
- [4] “Development of Novel Functional Organic Crystals by Utilizing Proton- and  $\pi$ -Electron-Donating/Accepting Abilities”, A. Ueda, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **90**, 1181 (2017).
- [5] “Hysteretic Current-Voltage Characteristics in the Deuterium-Dynamics-Triggered Charge-ordered Phase of  $\kappa$ -D<sub>3</sub>(Cat-EDT-TTF)<sub>2</sub>”, A. Ueda, *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* in press.



# 外国人客員所員を経験して

**Clifford HICKS**

**Max Planck Institute for Chemical Physics of Solids**

**Clifford.Hicks@cpfs.mpg.de**

At the start of my four-month stay at ISSP I had the fortune to overlap for a month with Profs. Premala Chandra and Piers Coleman. Along with my host, Prof. Nakatsuji, we enjoyed several after-lunch hours discussing  $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ , and experiments that could be done with symmetry-breaking magnetic fields and uniaxial pressure.

I met Prof. Nakatsuji in 2014, when he invited me to give a seminar at ISSP. My specialty is using piezoelectric actuators to place samples under uniaxial stress: to reversibly lift the symmetry of a lattice, and observe how electrical and magnetic properties that depend on that symmetry change in response. The Nakatsuji group synthesises a range of materials whose magnetic and/or topological properties are expected to change qualitatively with reduction in lattice symmetry. This gives us a number of things to talk about. Prof. Nakatsuji recognised promptly in 2014 areas of overlap, and this started a discussion that culminated in my stay at ISSP in summer of 2018.

And I hope that the collaboration will continue from there. These are rewarding but challenging experiments: to withstand large strains while maintaining good strain homogeneity, samples need to be shaped precisely, and then mounted with care. Within my own research group in Dresden it has been an effort of years to develop the processes and tools to do this reliably. During my summer stay we performed preliminary measurements on a correlated metal system, with a first-generation pressure cell jerry-rigged onto the end of a cryostat insert built for general transport measurements. We then started building a dedicated insert, with more measurement wires and dedicated high-voltage lines for

the piezoelectric actuators. This project is now in the capable hands of Dr. Ohtsuki.

While at ISSP, I also completed design work on a second-generation pressure cell that will allow simultaneous measurement of the stress and strain applied to a sample. Our mutual goal is to put three pressure cells into service in the Nakatsuji group: the first-generation cell mentioned above, this second-generation cell, and a commercial cell with a higher force range. The simultaneous stress and strain measurement capability of the second-generation cell will be extremely useful in identifying stress-induced structural transitions. This cell will accept the same sample carrier that we use in Dresden, which I hope will facilitate long-term collaboration and exchange of samples.

I enjoyed my stay at ISSP. I am grateful for the opportunity and I am impressed by the range of activities in the Nakatsuji group. I am also grateful to the administrative staff, who made the process of settling in quick and simple. I look forward to many future visits to Japan.

# 物性研究所談話会

**標題：近藤効果の非平衡ゆらぎ**

**日時：2018年7月5日(木) 午後4時～**

**場所：物性研究所本館6階 大講義室(A632)**

**講師：小林 研介**

**所属：大阪大学 大学院理学研究科 物理学専攻**

**要旨：**

半導体や金属を微細加工して作製される微小な固体素子をメゾスコピック系と呼ぶ。その最大の特長は、量子効果が本質的であるようなスケールにおいて、磁場や電場などの外場を利用することで、制御性の高い実験ができる点にある。たとえば、電子干渉計や人工原子等で発現するコヒーレンスや電子相関に基づく多彩な量子現象の観測とその制御は、1980年代以降の物性物理学の発展に大きな貢献を果たしてきた。

ところで、これまでにメゾスコピック系に対して行われてきた実験的研究の多くは、電流(あるいは電気伝導度)測定を主体とするものである。このような測定によって検出される情報は時間平均された性質である。その一方で、近年、非平衡状態の動的な情報を得る手段として、電流ゆらぎ測定が大きな関心を集めるようになってきた。

本談話会では、まず、メゾスコピック系における電気伝導と電流ゆらぎについて紹介する。その後、人工原子(カーボンナノチューブ量子ドット)を用いて、非平衡領域にある近藤効果について行った研究についてお話しする[1, 2, 3]。私たちの成果は、非平衡量子多体系に対して、理論を定量的に検証するレベルで精密な実験的研究が可能であることを示す。

本研究は、荒川智紀、秦徳郎、藤原亮(阪大理物)、M. Ferrier、R. Delagrance、R. Deblock、R. Weil (パリ南大-CNRS)、阪野豊(東大物性研)、寺谷義道、小栗章(大阪市大理)の各氏との共同研究によります。

[1] M. Ferrier et al., Nature Phys. 12, 230-235 (2016).

[2] M. Ferrier et al., Phys. Rev. Lett. 118, 196803 (2017).

[3] 解説として、小林研介、パリティ 32, 16-21 (2017).

**標題：光受容型膜タンパク質微生物型ロドプシンの機能の多様性の起源に迫る**

**日時：2018年8月23日(木) 午後2時～午後3時**

**場所：物性研究所本館6階 大講義室(A632)**

**講師：井上 圭一**

**要旨：**

海洋や湖沼、河川、土壌などをはじめとする地球上の様々な環境中には、莫大な数の細菌や藻類などの微生物が棲息しているが、近年のゲノム研究の発展により、その多くが細胞内に「微生物型ロドプシン」と呼ばれる光受容型膜タンパク質を持つことが明らかとなってきている。これら微生物型ロドプシンは、我々ヒトを含めた動物の網膜中に存在する「動物型ロドプシン」と極めてよく似た7回膜貫通型構造を持ち、さらに同じビタミンAの誘導体であるレチナールを発色団としてタンパク質内部に結合している。そしてレチナールが光を吸収すると、全トランス型から13シス型への異性化反応を起こし、細胞内外へ輸送する光駆動型イオンポンプや、電気化学勾配に沿って双方向にイオンを輸送する光ゲート式イオンチャネル、走光性センサーなど非常にバラエティに富んだ生理機能が発現される。

その中で、我々はこれまでにこれら微生物型ロドプシンが7回膜貫通型構造および発色団レチナールからなる共通構造をもとに、どの様にしてこれほどまでに多様な生理機能の発現を達成するのか、その分子メカニズムについて、過渡吸収







# 物性研究所セミナー

標題：LASOR セミナー/ナノサイエンスセミナー：Nanoscale optical control of coherent electron waves from a nano-tip and their outlook

日時：2018年7月6日(金) 午後1時30分～午後2時30分

場所：物性研究所本館6階 第2セミナー室(A612)

講師：Dr. Hirofumi Yanagisawa

所属：Ludwig-Maximilians University, D-85748 Garching, Germany

要旨：

In this presentation, we will overview our work on laser-induced electron emission from a tungsten tip. In particular, we will focus on optical control of electron emission sites on a scale of nanometers and their application for optical control of Young's electron interference.

Illuminating a sharp metallic tip with femtosecond laser pulses produces spatially and temporally confined electron pulses by plasmonic effects at the tip apex [1]. We have found that these plasmonic effects induce asymmetric electron emissions from the tip apex as schematically shown in Fig. 1. They also allow one to select the electron emission sites on a nanometer scale by changing the laser polarization [2]. Using this technique, we can manipulate electron emissions within their coherence time and area, which then enables us to control coherent electron emission in time and space. In a demonstration, we realized optical control of Young's electron interference [3]. The interference emerged between the two adjacent electron beams. The intensity of the interference could be successfully controlled by changing the laser polarization and intensity. The underlying physics that drove the interference was revealed by measuring the energy spectra [4, 5] and also by simulating the temporal evolution of the electron waves by solving a two-dimensional time-dependent Schrödinger equation [3]. Using a site-selective coherent electron source, we expect to create time-resolved electron holography with a possible time resolution in attoseconds.

In this presentation, we will overview our work on laser-induced electron emission from a tungsten tip. In particular, we will focus on optical control of electron emission sites on a scale of nanometers and their application for optical control of Young's electron interference.

## References

1. P. Hommelhoff, et. al., Phys. Rev. Lett. 96, 077401 (2006).
2. H. Yanagisawa, et. al., Phys. Rev. Lett. 103, 257603 (2009).
3. H. Yanagisawa, et al. Sci. Rep. 7, 12661 (2017).
4. H. Yanagisawa, et al. Phys. Rev. Lett. 107, 087601 (2011).
5. H. Yanagisawa, et al. Sci. Rep. 6, 35877 (2016).



**標題：極限コヒーレント光科学セミナー：アト秒高次高調波で探る光波電界周期スケール光物性**

**日時：2018年7月10日(火) 午後1時30分～午後2時30分**

**場所：物性研究所本館6階 第一会議室(A636)**

**講師：小栗 克弥**

**所属：日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所**

**要旨：**

今世紀初頭に発明されたアト秒光源技術、光時計技術、そして光位相安定化技術という3つの革新的光技術は、光を、時間領域において10-18秒スケールで計測可能かつ周波数領域において10-18精度で制御可能な振動電界として取り扱うことを可能にした。今や、光はサブペタヘルツ(PHz: 1015 Hz)周波数で振動する電界としてエンジニアリングが可能な電磁波、すなわち”PHz波”として再定義できる時期を迎えている。このようなPHz波における光物性を考えた場合、光波電界によって駆動されるコヒーレントな固体電子系応答と、そのコヒーレンスを消失させ、非平衡状態を経て熱平衡電子状態に緩和させる電子系散乱過程がそのダイナミクスを支配する。その典型的な時間スケールは、光波電界の数サイクルからサブサイクルに相当する10000～100asといった極めて短時間である。最近、大きな注目を集めている固体からの高次高調波発生、高強度光電界による絶縁体中の動的ツェナートンネリング効果、動的フランツ・ケルディッシュ効果といったコヒーレントな電子応答や、瞬時スクリーニングによる電荷秩序相の溶解、逆オージェ過程による電子多重励起といった極めて速い電子緩和過程は、この光波電界周期スケール光物性の典型例と言えよう。

我々は、高次高調波発生により真空紫外～軟X線領域に得られるアト秒パルスと[1]、ポンププローブ時間分解計測技術を組み合わせたアト秒パルス時間分解分光技術を開発し、光波(PHz波)–電子相互作用が引き起こす光波電界周期スケール光物性を解明することを目的として研究を進めている。これまでに、世界最短時間分解能200as吸収分光[2]、世界最短プローブ分解能サブ5fs角度分解光電子分光[3]、最高92eVプローブ光電子分光[4]などユニークな特徴を有する装置を開発してきた。本講演では、これらの装置を用いることにより観測に成功したワイドギャップ半導体における光電界誘起の非線形分極応答[1]、グラファイトにおける非平衡電子状態緩和[2]など、最新の成果について紹介する。これらの光波電界周期スケール光物性が切り拓く将来のPHz周波数動作機能の可能性についても議論したい。

[1] Oguri et al., Appl. Phys. Lett. 112, 181105 (2018).

[2] Mashiko et al., Nature Communications 9, 1468 (2018).

[3] Toume et al., in preparation.

[4] Oguri et al., Appl. Phys. Express 8, 022401 (2015).

**標題：極限コヒーレント光科学セミナー：光誘起相転移における非平衡電子状態の観測と光による物性制御への可能性の探求**

**日時：2018年7月19日(木) 午前11時30分～午後0時30分**

**場所：物性研究所本館6階 第一会議室(A636)**

**講師：岡崎 浩三**

**所属：東京大学物性研究所**

**要旨：**

角度分解光電子分光(ARPES)は、物質中の電子構造を直接観測できる強力な実験手法であり、電子構造の精密測定から物性の発現機構を明らかにする事ができる。いわゆる非従来型超伝導体においては、高分解能ARPESを用いることでクーパー対形成に伴う超伝導ギャップを運動量空間における異方性も含めて観測できることから、対形成機構の理解に大きな寄与を果たしてきた。講演者もこれまで極低温超高分解能レーザーARPES装置を用いてそのような報告をしてきている[1]。一方、フェルミ面の有無から金属か絶縁体かが判別できるように、超精密ARPESによって逆に電子構造から物性を予言する事も可能になると考えられる。一般に非平衡状態における物性を知る事は実験的に難しいが、超短パルスレー

ザーを用いた時間分解 ARPES によって非平衡状態における電子構造を観測する事で、そこで発現し得る物性を予測できるようになる事も期待される。

近年、銅酸化物高温超伝導体やアルカリ金属をドープしたフラーレン光誘起超伝導という現象が注目を集めている[2]。本セミナーでは、変位励起型コヒーレントフォノンに伴う非平衡電子状態の観測[3]から鉄系超伝導体の母物質の1つである BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> においても光誘起超伝導が実現する可能性があることを議論する。また、電子と正孔がクーロン相互作用によって束縛された状態である励起子が自発的に凝縮した系を励起子絶縁体と呼ぶが、その有力な候補物質である Ta<sub>2</sub>NiSe<sub>5</sub> における光誘起絶縁体-金属転移の観測結果を紹介し[4]、そのメカニズムにおいても、変位励起型コヒーレントフォノンが関係している可能性があることを議論する。さらに、光による物性制御実現の可能性など今後の展望についても議論したい。

- [1] K. Okazaki et al., Science 337, 1314 (2012), Y. Ota, K. Okazaki et al., Phys. Rev. Lett. 118, 167002 (2017), T. Hashimoto, K. Okazaki et al., Nat. Commun. 9, 282 (2018)など  
[2] M Mitrano et al., Nature 530, 461 (2016), S. Kaiser et al., Phys. Rev. B 89, 184516 (2014)など  
[3] K. Okazaki et al., Phys. Rev. B 97, 121107(R) 2018  
[4] K. Okazaki et al., submitted

**標題：理論セミナー：理論計算によるタンパク質の構造-機能解析**

**日時：2018年7月27日(金) 午後4時~午後5時**

**場所：物性研究所本館6階 第5セミナー室 (A615)**

**講師：重田 育照**

**所属：筑波大学計算科学研究センター**

**要旨：**

タンパク質は極めて複雑な構造と精緻な機能をもつ高分子化合物であり、分子認識、情報伝達、酵素反応など、生体内でおこる様々な生命現象の根幹をなす。立体構造と機能の間には大きな相関(構造-活性相関)があることが期待されていることから、これまで X 線回折実験や核磁気共鳴法(NMR)などの実験的手法により、数多くのタンパク質の立体構造が明らかにされてきた。特に最近では、X線自由電子レーザーやクライオ電顕、AFM や STM などの実験的解析手法によりタンパク質 1 分子の動的情報が得られつつあり、機能と構造変化の関わりが徐々に明らかになりつつある。そのような状況の中、実験事実をミクロスコピックなレベルで理解し、生体機能の予測をする理論計算に期待が集まっている。

近年のスーパーコンピュータの発展、および解析手法の進展が相まって、生体内でおこる化学反応解析の分野は格段の進歩を遂げている。本セミナーでは、生命現象を解析するための分子動力学法や第一原理計算を解説すると共に、我々の研究室が行っている研究に関して最新の話題を提供する。特に、創薬などで役に立つと考えられるタンパク質の折りたたみ問題やドメイン運動の自由エネルギー解析[1-3]、および、タンパク質物性の評価法、酵素反応に対する応用例[4-6]を紹介する。

1. R. Harada, Y. Takano, T. Baba, Y. Shigeta, "Simple, Yet Powerful Methodologies for Conformational Sampling of Proteins", Phys. Chem. Chem. Phys. (invited feature article) 17, 6155-6173 (2015).
2. J. Fujita, R. Harada, Y. Maeda, Y. Saito, E. Mizohata, T. Inoue, Y. Shigeta, H. Matsumura, "Identification of the key interactions in structural transition pathway of FtsZ from Staphylococcus aureus", J. Struct. Biol. 198, 65-73 (2017).
3. R. Harada, Y. Shigeta, "How low-resolution data can predict conformational changes of a protein: a molecular dynamics study", Phys. Chem. Chem. Phys. 20, 17790-17798 (2018).
4. M. Shoji, H. Isobe, Y. Shigeta, T. Nakajima, K. Yamaguchi, "Concerted Mechanism of Water Insertion and O<sub>2</sub> Release during the S<sub>4</sub> to S<sub>0</sub> Transition of the Oxygen-Evolving Complex in Photosystem II", J. Phys Chem. B 122 (25), 6491-6502 (2018).



5. K. Kamiya, T. Baba, M. Boero, T. Matsui, S. Negoro, Y. Shigeta, "A Nylon-oligomer Hydrolase Promoting Cleavage Reactions in Unnatural Amide Compounds", *J. Phys Chem. Lett.* 5, 1210-1216 (2014).
6. K. Kamiya, Y. Shigeta, "First-principles Molecular Dynamics Studies on the Atomistic Behavior of His503 in Bovine Cytochrome c Oxidase", *Biochim. Biophys. Acta*, 1807, 1328-1335 (2011).

標題：ナノサイエンスセミナー：Quantum Molecular Machines

日時：2018年8月3日(金) 午後1時30分～午後2時30分

場所：物性研究所本館6階 第2セミナー室(A612)

講師：Prof. Saw-Wai Hla

所属：Ohio University and Argonne National Laboratory, USA.

要旨：

One of the goals of nanotechnology is to develop complex molecular machines that can be operated in a solid-state environment. This talk will present molecular motors and molecular linear transport devices operating in the quantum regime on materials surfaces. Fundamental operations of these machines are investigated in an atomically clean environment using low temperature scanning tunneling microscopy, and molecular manipulations[1], [2]. These investigations reveal how charge and energy transfer are taken place within single molecule machines and molecular networks. Moreover by introducing dipole active components in the rotor arms, communication among the molecular motors can be introduced. Synchronization of the motors can be achieved depending on the symmetry of the molecular assemblies and the strength of the electric field. Furthermore, individual molecular motors can be charged using the inelastic tunneling scheme. For a comparison with spintronics of molecular machines, we will also present anomalous Kondo resonance observed for the magnetic molecules adsorbed on graphene nanoribbons [3]. For the linear transport, the development of molecular hoverboards and molecular cars for a control transport at the nanoscale will be presented.

- [1] Y. Zhang, H. Kersell, R. Stefak, J. Echeverria, V. Iancu, U.G.E. Perera, Y. Li, A. Deshpande, K.-F. Braun, G. Rapenne, C. Joachim, and S.-W. Hla. Simultaneous and coordinated rotational switching of all molecular rotors in a network, *Nature Nanotechnology* 11, 706 (2016).
- [2] U.G.E. Perera, F. Ample, H. Kersell, Y. Zhang, G. Vives, J. Echeverria, M. Grisolia, G. Rapenne, C. Joachim, and S.-W. Hla. Controlled clockwise and anticlockwise rotational switching of a molecular motor, *Nature Nanotechnology* 8, 46 (2013).
- [3] Y. Li, A. Ngo, A. DiLullo, K.Z. Latt, H. Kersell, B. Fisher, P. Zapol, S.E. Ulloa, and S.-W. Hla. Anomalous Kondo resonance mediated by semiconducting graphene nanoribbons in a molecular heterostructure, *Nature Communications* 8, 946 (2017).

標題：セミナー：第 17 回 関東ソフトマター研究会

日時：2018 年 8 月 8 日(水) 午前 10 時～午後 7 時 30 分

場所：物性研究所本館 6 階 大講義室(A632)

要旨：物理・化学・生物・工学と分野の垣根を越えてソフトマターの研究に関して議論することを目的とし、関東の大学、研究所の学生・若手研究者を中心として開催する。

標題：中性子セミナー：磁性体における偏極中性子散乱研究 一定常炉・核破砕炉の相補利用を見据えて

日時：2018 年 8 月 20 日(月) 午後 1 時 30 分～午後 2 時 30 分

場所：物性研究所本館 6 階 第 5 セミナー室(A615)

講師：南部 雄亮

所属：東北大学金属材料研究所

要旨：

中性子のスピン自由度に着目した偏極中性子散乱は、磁性体を始めソフトマターなど様々な物質群に対して行われてきた。偏極中性子といえば、これまでは核反射と磁気反射の分離や、磁気構造の精度良い決定を目的に用いられることが多数であった。しかしながら、近年は中性子実験施設における中性子束の増強や偏極機器の開発・改良によって、非弾性領域や上記以外の目的についても実験を行えるようになってきた。例えば、Bravias 格子の場合、磁気構造の決定には規約表現が有用ではなく、磁気モーメントの向きを一意に決定することが難しい場合がある。偏極中性子の SF と NSF を比較することで、中性子スピンに垂直な面に対する磁気モーメントの面内・面間成分の分離ができることはよく知られている。また、偏極中性子方向を変えることでカイラル項や核磁気干渉項の観測を行うことが可能である。これらは、トポロジカルな性質を持つ物質の理解に必須な情報であり、今後標準的な測定手法になっていくものと予想される。

本講演では、偏極中性子散乱一般を議論するため、中性子スピン方向を正規直交系に分解した Blume-Maleev の表式から始め、それぞれの散乱チャンネルから観測できる物理量をまとめる。その後、我々の磁性体における偏極中性子散乱の例を挙げ、スピンの面内面間成分の分離や、スピントロニクス物質における非弾性散乱領域のヘリシティがスピナーベック効果と関連することを示す。また、東北大学が J-PARC に建設している偏極中性子散乱装置 POLANO を紹介し、定常炉と核破砕炉での棲み分けの観点から、JRR-3 再稼働後にそれぞれで展開しうる偏極中性子研究について議論を行いたい。

標題：中性子セミナー：希土類単分子磁石の中性子散乱研究

日時：2018 年 8 月 20 日(月) 午前 11 時～午後 0 時

場所：物性研究所本館 6 階 第 5 セミナー室(A615)

講師：古府 麻衣子

所属：J-PARC センター

要旨：

単分子磁石とは、ナノスケールの単一分子が保磁力を示し、あたかも磁石のように振る舞う物質群である。通常の磁石(強磁性体)と異なり、分子間の相互作用は無視できるほど弱く長距離秩序は現れない。保磁力の起源は、分子の大きな磁気モーメントと磁気異方性が、上向きと下向きのスピンの間に高いポテンシャル障壁を作り出し、磁化反転を非常に遅くするためである。単分子磁石は、その磁化反転機構が物理的に興味深いだけでなく、1 分子メモリーとして応用の観点からも注目されている。1980 年に最初の単分子磁石 Mn12 錯体が発見されて以降、3d 遷移金属を含む物質が数多く研究されてきた。2000 年以降、希土類元素を含む単分子磁石の研究が盛んに進められている。希土類単分子磁石の面白さのひとつは、量子性が色濃く現れることである。ポテンシャル障壁を超える単純な古典的熱活性過程ではなく、トンネリング過程を介した磁化反転過程が観られることが多く、そのメカニズム解明が中心的研究となっている。



本セミナーでは、Tb-Cu 二核錯体や現在研究を進めている Zn-Ln-Zn (Ln = Ce, Pr, Nd) 三核錯体の中性子散乱研究について紹介する。Zn-Ln-Zn 錯体では、分子中の磁性イオンは1つのみで、f 電子数の偶奇性に応じて磁気緩和挙動が大きく変化する。クラマースイオンである Ce ( $J = 5/2$ )と Nd ( $J = 9/2$ )は単分子磁石的挙動を示すが、非クラマースである Pr ( $J = 4$ )では遅い磁気緩和は観測されない(非単分子磁石)。中性子非弾性散乱により得られた磁気励起スペクトルも、f 電子数の偶奇性で大きく変わる。これは、基底状態の違いと単分子磁石挙動が密接に関わっていることを示している。また、我々は中性子準弾性手法を用いて磁気緩和の観測を試みた。交流磁化率測定で観測された遅い磁気緩和と合わせることで、緩和の全体像を捉えることに成功した。その結果、磁気緩和が単純な Orbach 機構では記述されないことが明らかになった。

講演では、最近始めた磁性イオン液体の研究についても触れ、今後の研究の展望について述べたい。

**標題：セミナー：超高速半導体レーザー動作のデバイス物理**

**日時：2018年8月23日(木) 午前10時30分～午後0時**

**場所：物性研究所本館6階 第5セミナー室(A615)**

**講師：松井 康浩**

**所属：Finisar Corp. Principle Engineer, and Visiting Professor of NICHe, Tohoku University**

**要旨：**

半導体レーザーの変調帯域は、30 GHz 程度の帯域を達成した後、ここ 20 年近く、進展はあまり見られなかった。最近、いくつかの素子物理を組み合わせることで、60 GHz の帯域が実証され、更なる高速化が期待されている。講演では、半導体レーザーの動作速度を記述するレート方程式を直感的に理解することから始め、古くから知られながらも最大限に活用されてこなかった共振器効果として、フォトン-フォトン共鳴効果、Detuned-loading 効果、及び、最近指摘された、共振器内 FM-AM 変換の効果、を解説する。これらの効果は、高速化を可能にするだけでなく、振動のダンピングにも大きな影響を与え、従来の利得スイッチやモード同期とは異なる、新たなタイプの柔軟な光パルス光源を生み出す可能性もある。また、戻り光に対する強い耐性を持つことも期待される。

**標題：ナノサイエンスセミナー：MBE-STM を用いた重い電子系化合物薄膜の研究**

**日時：2018年9月7日(金) 午後2時30分～午後3時30分**

**場所：物性研究所本館6階 第4セミナー室(A614)**

**講師：土師 将裕**

**所属：京都大学理学研究科**

**要旨：**

ランタノイドやアクチノイドなど、f 電子を含む化合物は重い電子系化合物と呼ばれる。強いクーロン斥力によって局在した f 電子は、近藤効果による伝導電子との混成(c-f 混成)によって低温では遍歴的にふるまう。それらの競合によって有効質量が通常よりも非常に大きい重い電子状態を形成する。このように、近藤効果によって、非磁性の重い電子状態を誘起する一方で、Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida (RKKY)相互作用によって f 電子間の磁気秩序状態が誘起される。したがって、近藤効果と RKKY 相互作用の競合によって、磁気秩序相転移が 0 K で起こる量子臨界点が存在する。量子臨界点周辺においては、非フェルミ液体や非従来型超伝導など、多彩な興味深い物性が発現する。

以上のことから、重い電子系化合物は、非常に興味深い研究対象として注目を集めており、数多くの物性測定がなされている。しかしながら、走査トンネル顕微鏡(STM)を用いたナノスケールでの電子状態測定は、限られた物質でしか行われていない。その理由として、単結晶の劈開性の悪さから、STM 測定に適した清浄面を得るのが困難であることが挙げられる。

一方で、分子線エピタキシー法(MBE)と呼ばれる薄膜成長技術が近年注目を集めており、高純度の薄膜や人工超格子などの作製が行われている[1]。この技術を用いれば、STM 測定に適した原子レベルで平坦な表面を容易に得ることができ、STMを用いた重い電子系化合物研究が加速されることが期待できる。

そこで本研究では、MBE によって成長させた重い電子系化合物である CeCoIn5 及び CeRhIn5 薄膜のその場 STM 観察を行った。講演ではまず、非従来型超伝導体である重い電子系超伝導体 CeCoIn5 中の不純物効果[2]についての講演を行う。次に、重い電子系反強磁性体 CeRhIn5 における c-f 混成状態[3]についての講演を行う。

#### References

- [1] M. Shimozawa et al., Rep. Prog. Phys. 79, 074503 (2016).
- [2] M. Haze et al., J. Phys. Soc. Jpn. 87, 034702 (2018).
- [3] M. Haze et al., submitted.

#### 標題：中性子セミナー：中性子散乱で観る創発スピン構造

日時：2018年9月7日(金) 午後3時30分～午後4時～30分

場所：物性研究所本館6階 第2セミナー室(A612)

講師：富安 啓輔

所属：東北大学大学院理学研究科

#### 要旨：

「スピン構造」は基礎科学的な魅力と応用的な可能性を併せ持つ多彩な物性の源である。金属絶縁体転移・巨大磁気抵抗・トポロジカル効果・スピントロニクス現象は、その代表と言える。スピン構造は、動的と静的、短距離と長距離に大きく分類され、そのいずれの観測にも中性子散乱法は大きな役割を果たしている。

本セミナーでは、フラストレーションやスピנקロスオーバーにより生成される「スピン分子」と呼ばれる動的短距離スピン構造体と「all-in all-out」と呼ばれる静的長距離スピン構造体を観測した研究を紹介する。前者はパルス中性子源のチョッパー分光器を、後者は定常中性子源の粉末回折計と三軸分光器を用いておこなった。

「スピン分子」とは、1 nm 程度の分子のような形状を持つ磁気的な素励起のことである。我々は、スピン分子を、局在スピン系 MgCr2O4、遍歴スピン系 LiV2O4、局在と遍歴の狭間に位置づけられる LaCoO3 において観測して来た [1-3]。最近では、スピン分子はトポロジカルチャージという新たな基礎概念で記述されること、異常なマクロ物性(断熱・防音機能)の生成源として熱制御の応用シーズになりうることも報告されている[4,5]。

「All-in all-out」とは、スピンの自らの属する正四面体の中心方向のみ、あるいは、その反対方向のみを向いた磁気構造のことである。例えば、Nd2Ir2O7 等のパイロクロアについて、3次元トポロジカル Weyl 半金属ないしは近傍物質である証拠として理論的に提唱され、実験的にも温度や磁場誘起の金属絶縁体転移や磁気ドメイン導電現象を生み出す基礎構造を与える [6]。しかしながら、その中性子実験は、(1) Ir の磁気モーメントが小さい ( $< 0.3 \mu\text{B}$ )、(2) 磁気伝播ベクトルが (0, 0, 0) である、(3) 二つの磁性元素からなるパイロクロアの磁気構造決定は相当数のパラメータを含む最適化問題になる、という困難が重なり、不可能だと思われていた。我々がこの問題をいかに解決したか、最新の数理情報科学と中性子実験の融合により、all-in all-out 磁気構造の最終決定に至るまでをお話しする [7]。

最後に、今後の中性子研究の展望について述べる。

- [1] KT et al., PRL 101, 177401 (2008); PRL 101, 177401 (2013).
- [2] KT et al., PRL 110, 077205 (2014).
- [3] KT et al., PRL 119, 196402 (2017); KT et al. (submitted).
- [4] T. Mizoguchi et al., PRL 119, 077207 (2017); arXiv:1806.08534.
- [5] T. Watanabe et al., PRB 86, 144413 (2012); H. Zhou et al., PRB 87, 174436 (2013).







非弾性散乱を量子開放系として定式化することにより、近藤相互作用の係数が複素数で与えられる、非エルミート近藤模型を導出することができる。この非エルミート近藤模型をくりこみ群を用いて解析することにより、通常のエルミートな系では現れることのない(具体的には、量子不純物系の  $g$ -定理を破る)新奇なくりこみ群フローと、それに付随した量子相転移が現れることを示す。また、われわれは、この非エルミート近藤模型の厳密解を Bethe 仮設法を用いて導いた。厳密解の示す量子相転移線はくりこみ群による結果とよく一致する。

Reference:

- [1]A. V. Gorshkov et al., Nat. Phys. 6, 289 (2010).
- [2]L. Riegger et al., Phys. Rev. Lett. 120, 143601 (2018).
- [3]M. Nakagawa, N. Kawakami, and M. Ueda, arXiv:1806.04039.

**標題：極限コヒーレント光科学セミナー：スパースモデリングを活用したコヒーレント軟 X 線回折イメージング**

**日時：2018 年 9 月 28 日(金) 午前 10 時～午前 11 時 30 分**

**場所：物性研究所本館 6 階 第一会議室(A636)**

**講師：山崎 裕一**

**所属：国立研究開発法人 物質・材料研究機構(NIMS)**

**要旨：**

コヒーレント軟 X 線回折磁気イメージング(CDI) 法は、集光レンズを用いずにナノメートルスケールの磁気構造を実空間観測できる手法である。観測された回折図形からホログラフィー法や位相回復アルゴリズム法によって位相情報を回復し実空間像を再構成することができる。我々は、ナノメートルスケールのトポロジカル磁気構造体である磁気スキルミオンに着目し、CDI 法による実空間観測することに成功している[1]。しかし、本手法は高精度の実空間像を観測するために長時間の計測が必要であり、磁気構造の高速な時間変化を観測することは難しい。そこで、計測対象のスパース性に関する事前情報を取り込んだ新しい位相回復アルゴリズムを考え、低精度な計測データからも効率よく情報抽出できる解析手法を開発している。

本セミナーでは、コヒーレント軟 X 線回折磁気イメージングの最近の進展とスパースモデリングを活用した位相回復アルゴリズムについて紹介する。

- [1] V. Ukleev, Y. Yamasaki, et al., QUANTUM BEAM SCIENCE 2, 3[1] (2018)

**標題：理論セミナー：Lattice model constructions for gapless domain walls between topological phases**

**日時：2018 年 10 月 2 日(火) 午後 4 時～**

**場所：物性研究所本館 6 階 第 5 セミナー室(A615)**

**講師：Prof. Shuo YANG**

**所属：Department of Physics, Tsinghua University**

**要旨：**

Lattice models of gapless domain walls between twisted and untwisted gauge theories of finite group  $G$  are constructed systematically. As simple examples, we numerically studied the gapless domain walls between twisted and untwisted  $Z_N$ (with  $N < 6$ ) gauge models in 2+1D using the state-of-art loop optimization of tensor network renormalization algorithm. We also studied the physical mechanism for these gapless domain walls and obtained quantum field theory descriptions that agree perfectly with our numerical results. By taking the advantage of the systematic classification and construction of twisted gauge models using group cohomology theory, we systematically construct general lattice models to realize gapless domain walls for arbitrary finite symmetry group  $G$ . Such constructions can be generalized

into arbitrary dimensions and might provide us a systematical way to study gapless domain walls and topological quantum phase transitions.

標題：量子物質セミナー：Axion electrodynamics and the quantized topological magnetoelectric effect in topological insulators

日時：2018年10月16日(火) 午後1時30分～午後3時

場所：物性研究所本館6階 第一会議室 (A636)

講師：Prof. N. Peter Armitage

所属：The Johns Hopkins University, USA

要旨：

Topological insulators have been proposed to be best characterized as bulk magnetoelectric materials that show response functions quantized in terms of fundamental physical constants. Here we lower the chemical potential of three-dimensional (3D) Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> films to 30 meV above the Dirac point, and probe their low-energy electrodynamic response in the presence of magnetic fields with high-precision time-domain terahertz polarimetry. For fields higher than 5 T, we observed quantized Faraday and Kerr rotations, whereas the DC transport is still semi-classical. A non-trivial Berry phase offset to these values gives evidence for axion electrodynamics and the topological magnetoelectric effect. The time structure used in these measurements allows a direct measure of the fine structure constant based on a topological invariant of a solid-state system. I'll also discuss our most recent measurements on topological insulator single crystals that give evidence for a half quantized Hall effect on the TI surfaces.

Ref. L. Wu et al., Science 354, 1124 (2016).

## 編集後記

今回もトポロジーを中心に物性研の成果が多数、記事として掲載されています。その中に室内発生磁場として世界最高となる 1200 テスラの発生に成功したものがあります。これは物性研の国際超強磁場科学研究施設が実に半世紀もかけて達成した偉業です。記事には実験のポイントが分かりやすく解説されていますが、読者はスケールの大きさに驚かされると共に、現場での苦勞も感じることでしょう。今後、利用実験で実施される物性研究が楽しみです。

松 田 巖