

## グラフェンでできた超伝導／強磁性／超伝導接合における磁性と超伝導の競合

神田 晶申 / 筑波大学 数理物質系 物理学域 准教授

炭素の2次元六方格子であるグラフェンは、フェルミ準位近傍の低エネルギーで円錐状の伝導体と価電子帯が頂点で接する線形のエネルギー分散を持つので (図1)、伝導電子 (ホール) は質量ゼロのディラック粒子として振舞います。その結果、“相対論的”とも呼べる効果が身近な固体中で起こり、固体の他の性質との相互作用を通して多くの新奇物理現象が現れることが期待されています。さらに、これをうまく使うと超高性能の電子デバイスを作ることも可能です。我々は特に、グラフェン／超伝導体、グラフェン／強磁性体接合に着目して研究をおこなっています。

グラフェン／超伝導体接合において特殊な現象を観測するためには、超伝導体との界面におけるグラフェンのキャリア密度をゼロに近づけることが肝要となります。一方で、現実のグラフェンでは、ゲート電界によってキャリア密度を変化させようとしても、電極との接合界面ではキャリア密度が固定化 (ピン止め) され、ゼロにできないことが、伝導特性の接合長依存性から明らかになりました。現在ピン止めをはずすために、接合界面に多層グラフェンを成長する技術を開発しており、良好な結果を得つつあります。

一方、グラフェン／強磁性体界面では、強磁性体からのスピン注入を起こすことで、グラフェン内にアップスピン数、ダウンスピン数の差を誘起することができます。Hanle 法という方法を使って、グラフェン中のスピン数の差の拡がり数ミクロンに達することを確認しました。

このような性質を使うと、超伝導体／グラフェン／超伝導体接合のグラフェン部分に強磁性体を接続した構造において、実効的な超伝導／強磁性／超伝導 (SFS) 接合が実現できることが期待されます。理論では、グラフェン構造を持つ SFS 接合モデルの解析が行われており、様々な興味深い現象が予言されています。本研究では、その検証を行うことが最終目標です。



かんだ・あきのぶ

京都府宇治市出身。東京大学理学部物理学科卒、同大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。理化学研究所基礎科学特別研究員、同フロンティア研究員、筑波大学物理学系助手、講師を経て現職。最近気分転換と減量を兼ねて、近所のジムに登録しました。いつまで続くことやら…。

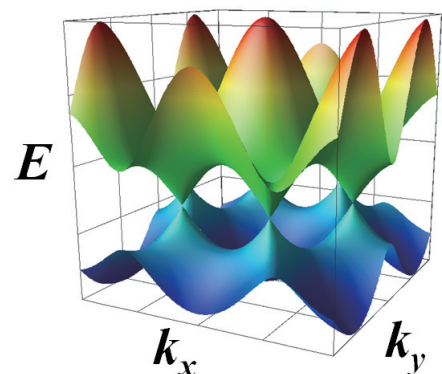


図1：グラフェンのバンド構造

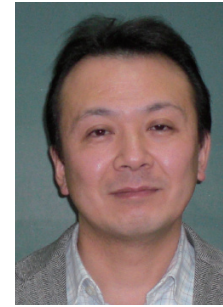
## 一軸応力下比熱・磁歪測定によるスピン三重項超伝導二段転移の解明

天谷 健一 / 信州大学 教育学部 教授

$\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  は転移温度が 1.5 K のスピン三重項の対称性をもつ第二種超伝導体ですが、超伝導が消失する磁場（上部臨界磁場  $B_{c2}$ ）直下でもう一段超伝導転移が生じるという、「超伝導二段転移」という特異な現象が見つかっています。この二段転移は、これまで2つの連続する2次相転移と考えられていたのですが、最新の精密測定によれば、そうではない可能性が指摘されています。また、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  と析出相の界面において、本来の超伝導（1.5K 相）の他に超伝導転移温度が約 3 K の超伝導（3K 相）が生じることが知られていましたが、「3 K 相」の体積分率は [001] 軸方向の一軸応力によって劇的に増大する一方、「1.5 K 相」の超伝導転移温度は、一軸応力によって減少することが明らかになってきました。磁場下での超伝導二段転移や奇妙な一軸応力依存性の起源を明らかにすることが  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のスピン三重項超伝導の発現機構の本質的な解明につながると考えられます。

公募研究では、まず、常圧における磁化や磁気トルク測定などの熱力学的測定により、常圧における「超伝導二段転移」の次数を明らかにしたあと、一軸応力下における物性測定を行ない、この超伝導転移の一軸応力依存性と磁歪の磁場依存性を比較し、一軸応力依存性や超伝導二段転移の起源を明らかにすることを目指しています。

図1に実験結果の一例として、磁気トルクから得られた超伝導磁化の磁場に垂直な成分  $M_{\perp}$  の磁場依存性を示します。1.1 T から 1.3 T にわたる「超伝導二段転移」が発生する磁場領域において、磁化が磁場の上げ下げによって異なる値をとる「ヒステリシス」が見られます。このことから、上部臨界磁場  $B_{c2}$  での転移の次数ははっきりとはわかりませんが、その直下で起こる転移は1次相転移の可能性が強いことがわかりました。



てんや・けんいち

1966 年生まれ。北海道出身。1990 年慶應義塾大学工学部卒。1994 年慶應義塾大学大学院理工学研究科物理学専攻博士後期課程中退。北海道大学理学部助手、信州大学教育学部准教授を経て、現職。キャンパス分散型の「タコアシ大学」に所属しているため、長野と松本を往復しています。

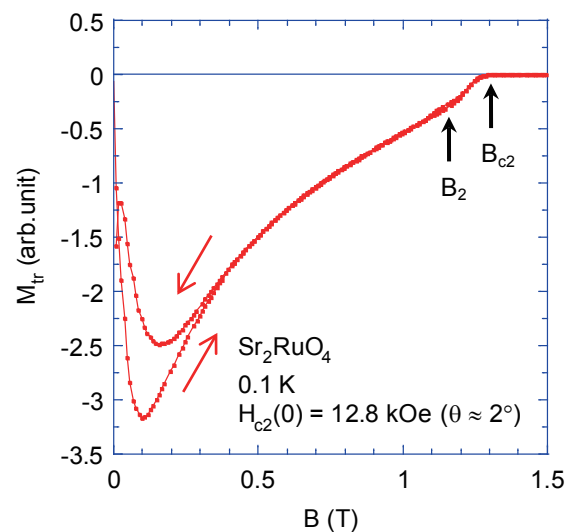


図1：超伝導磁化の磁場に垂直な成分

## ジョセフソン効果による時間反転対称性の破れた超伝導状態の検証

住山 昭彦 / 兵庫県立大学 大学院物質理学研究科 教授

私がこれまで研究してきた、重い電子系超伝導体と呼ばれる Ce 化合物や U 化合物では、超伝導電子対が従来型のスピン 1 重項  $s$  波とは異なる状態にあると考えられており、その中には、超伝導電子対が時間反転対称性の破れた状態にある可能性が示唆されているものがあります。時間反転対称性の破れの検証では、 $\mu$  SR による自発磁場の検出に関するものが多いですが、私はこれらの超伝導体と従来型超伝導体間のジョセフソン効果を用いた検証を目指しています。

ジョセフソン効果は 2 つの超伝導体間の位相差を直接的に感知するため、良質の素子ではスリットによる光の回折現象と同様に、ジョセフソン臨界電流が磁場に対してフラウンホーファー回折図形を描いて増減しますが、時間反転対称性の破れがある場合は、時間反転に対応する磁場方向の反転に対し非対称で、複雑な磁場依存性を示すことが予想されます。実際の研究では、地球磁場の影響等で見かけ上の時間反転対称性の破れが見られることが多いですが (図 1 (a))、素子の構造、磁場遮蔽等の改善により、フラウンホーファー回折図形の磁場依存性が得られれば、時間反転対称性は破れていないと解釈できます (図 1 (b))。

本研究で対象としている  $UPt_3$ ,  $URu_2Si_2$  は時間反転対称性の破れの可能性が議論されていましたが、ジョセフソン効果で見える限りは時間反転対称性の破れていない結果が得られてきています。特に  $UPt_3$  では、3 つの直交する結晶軸方向について良質の素子が得られるようになり、最近提案された  $E_{1u}$  の対称性を持つ、時間反転対称性を破らない秩序変数で結果を説明できることが明らかになりました [2]。一方、空間反転対称性のない超伝導体の  $LaPt_3Si$  で見られた、非対称な磁場依存性の原因はまだ分かっておらず、時間反転対称性の破れのような本質的な原因によるのかについては、今後の研究課題であると考えております。

[1] A. Sumiyama *et al.*: Phys. Rev. B 72 (2005) 174507.

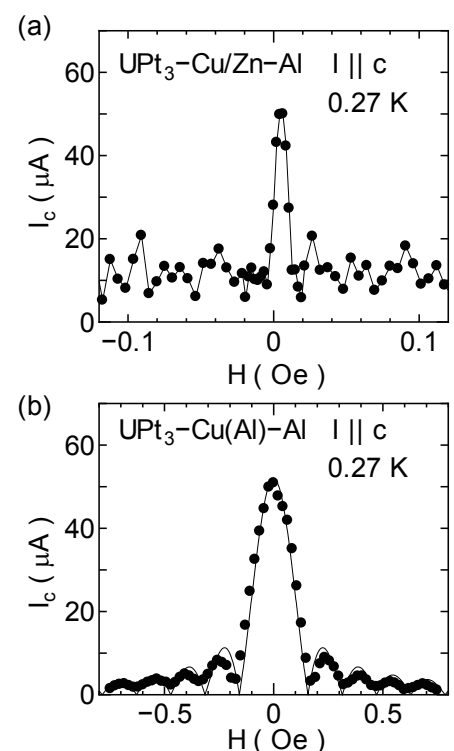
[2] J. Gouchi *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. 81 (2012) 113701.

図 1  $UPt_3$  のジョセフソン効果。  
(a) 以前の素子 [1]、(b) 本研究で改善された素子 [2]。



すみやま・あきひろ

大阪府出身、1986 年東京大学大学院 理学系研究科 博士課程修了。三菱化成工業 (株) 総合研究所所員、姫路工業大学理学部 講師を経て、2008 年より現職の兵庫県立大学大学院 物質理学研究科 教授。  
最近、すっかり細かい作業が学生任せになってしまいました。



## 不均一超流動 $^3\text{He}$ における奇周波数状態のもたらす磁氣的性質の研究

松本 宏一 / 金沢大学 理工研究域・数物科学系 教授

エアロジェルという多孔体中に液体  $^3\text{He}$  を満たすと超流動性が抑制される。従って、スピン三重項・ $P$  波超流動状態とエアロジェルという不純物によって作られるフェルミ液体との界面を作ることができる。東谷氏 (広島大) らの理論によればエアロジェルと超流動  $^3\text{He}$  の系では、異方的なクーパー対は不純物散乱により破壊され、表面に共存していた奇周波数と偶周波数のクーパー対の内、奇周波数  $S$  波クーパー対のみが存在できる。この効果により帯磁率の増加という現象が予測されている。本学術領域のメンバーである石川氏 (大阪市大) らは、磁場勾配下での NMR により研究を行っているが、本研究では SQUID を用いた高感度の磁化・交流帯磁率同時測定により、帯磁率の異常を観測することを目的としている。

図 1 に示すような核断熱冷凍機を用い超流動状態まで冷却する。これまでに、試料にかかる静磁場マグネット、SQUID を用いたブリッジ回路、ピックアップコイルのテストなどを行った。試料であるエアロジェルの合成において、ガラス管内のゲルを乾燥する過程でゲルに割れや収縮が発生する問題が生じた。解決に時間を要したが、現在はゲルの実験セル内への設置方法を工夫するなどして、研究を行っている。

我々はエアロジェル中の液体  $^3\text{He}$  を伝播する超音波の実験も行った。常流動領域において、音速と減衰に異常なピークを観測した。本学術領域のメンバーである竹内、東谷両氏 (広島大) は Kunusen 領域と流体力学的領域のクロスオーバーが音波の減衰の温度依存性に強く影響することを理論的に示した。領域研究会等で両氏と議論し、我々の観測した音波伝播の異常は、音波伝播の領域がクロスオーバーする温度域で粘性率が変化することによる透過率の変化に起因すると考え、解析を行った。その結果、クロスオーバー領域で起こる音波の異常な減衰の温度圧力依存性や減衰の大きさを説明する事ができた。



まつもと・こういち

1960 年東京都出身。  
83 年東京工業大学理学部卒業、  
88 年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。89 年東京工業大学助手、99 年金沢大学助教授、2010 年教授、現在に至る。  
 $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$  の超流動を中心とした低温物理実験のほか、低温工学の研究も行っています。



図 1 核断熱冷凍機と磁気特性測定装置

## 超流動 $^3\text{He}$ 中のトポロジカルオブジェクトの検出と制御

佐々木 豊 / 京都大学 低温物質科学研究センター 教授

核整列固体  $^3\text{He}$  や常流動・超流動  $^3\text{He}$  を対象に核磁気共鳴 (NMR)、超音波吸収、高精度圧力測定機械振動子測定などの手段により、最もシンプルな構成要素からなる強相関物質の、複雑でかつ魅力的な多体現象の研究を行って来ました。近年は空間不均質な秩序構造を探索するために NMR の発展系としての磁場勾配下 NMR や磁気共鳴映像法 (MRI) の開発に力を入れ、世界初の超低温 MRI 撮影装置 (ULTMRI) の開発に成功しました。

本領域では、超低温 MRI 撮影装置 ULMRI を発展させて超流動  $^3\text{He}$  のテクスチャーなど空間不均質な秩序構造の直接測定手段を開発することにより、テクスチャー中に生成する欠陥や量子渦などのトポロジカルオブジェクトの構造や生成消滅機構などについて研究しています。また外場による変形のダイナミクスなどを調べることでテクスチャー制御の可能性を追求したいと思っています。

図 1 に示されているのは 1.5mK で撮影した超流動  $^3\text{He}$ -A 相 B 相共存状態の MRI 画像です。対称性の異なる 2 相の間には 1 次相転移が挟まれており、通常の実験条件下では過冷却状態での安定相の核生成のあとは速やかに安定相のみの単相状態になるのですが、多孔質物質エアロジェル中では有限幅の温度領域で共存状態が保たれます。その状態を温度精度  $1 \mu\text{K}$  で保つことで MRI 画像の取得に成功したものです。オレンジ色で示された円形の A 相の中に出現したくさび型の色の濃い領域が B 相の位置を表しています。

通常の MRI 撮影では信号源となる核スピンの密度の空間分布のみを取得するのですが、現在開発中の新手法では共鳴周波数の空間分布も同時に取得することができ、その情報から空間不均質な秩序状態の空間変化を直接知ることができます。この世界初の測定法を利用して、超流動ヘリウム中に現れるトポロジカルオブジェクトの実体を可視化する計画を進めています。



ささき・ゆたか

1961 年大阪府出身  
1983 年京都大学理学部卒業、  
1988 年同大学院理学研究科博士  
後期課程研究指導認定退学、  
同大学文部技官、1990 年米国  
カリフォルニア大バークレー校  
博士研究員、1993 年京都大学  
理学部助手、2002 年京都大学  
低温物質科学研究センター助教  
授、准教授を経て 2012 年より  
教授。

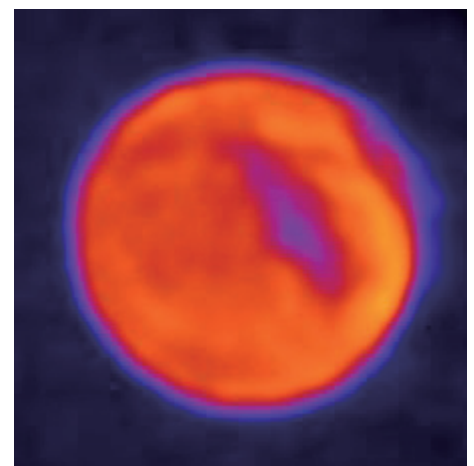


図 1 : 超流動  $^3\text{He}$ -A 相 B 相共存状態の MRI 画像

## 2次元光格子中の冷却イッテルビウム原子におけるゲージ場創生の新技術

吉川 豊 / 京都大学 大学院理学研究科 助教

2011年4月よりB01班の公募研究に参加させていただいています。私はこれまで、光を用いたボース・アインシュタイン凝縮体をはじめとする極低温気体原子の量子操作から、軌道角運動量を持った光ビーム、光ナノファイバーやフォトニック結晶共振器などのナノ量子光学デバイスの開発まで様々な研究を行ってきました。その経験を生かし、本学術領域では光格子中の冷却イッテルビウム原子に人口ゲージ場を発生させる実験的研究を行なっています。

人口ゲージ場は、非共鳴光を冷却原子系に照射することによって仮想的なゲージ場ポテンシャルを作り出し、本来電荷を持たない中性原子を磁場中の荷電粒子と同等に振る舞わせる技術です。本研究では特に、2次元光格子中の冷却イッテルビウム原子(図1)に対して、光誘起トンネリングと呼ばれる手法を用いて、非常に高強度の人口ゲージ場(1プラケット当りのパイエルス位相が $\pi$ のオーダー)を発生させる実験を行なっています。この技術によって、気体原子系で量子ホール状態やスピンホール状態などのトポロジカル量子状態の実現が期待されます。また、量子縮退原子を用いることで、不純物ゼロや極低温(ナノケルビンオーダー)の実験環境が容易に作れるうえ、イッテルビウム原子はボゾンとフェルミオン両方の安定同位体が利用できます。そのため、固体電子系で発展してきた既知の現象の高精度検証にとどまらず、物性物理学の枠組みを超えた新しい物理分野を開拓できる大きな可能性を秘めています。



よしかわ・ゆたか

1976年生まれ。東京都出身。慶應義塾大学理工学研究科物修士課程修了後、東京大学大学院総合文化研究科助教を経て、現職。趣味はサイクリング、ジョギングなど。

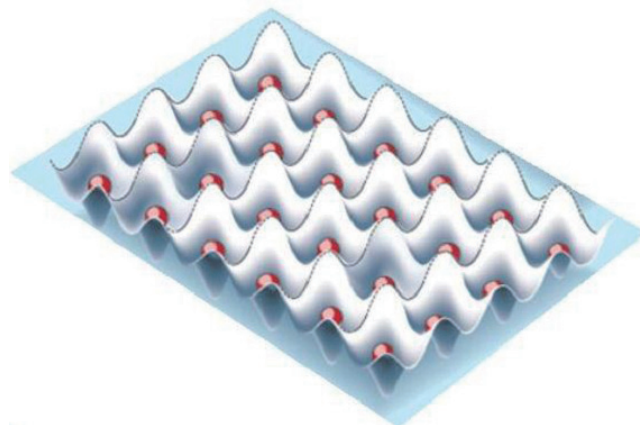


図1：2次元光格子ポテンシャル中にトラップされた冷却原子の模式図

## 微小磁場中スピノルボーズ凝縮体を用いた新奇量子渦の実現

東條 賢 / 中央大学 理工学部 准教授

希薄 Rb 原子気体のボーズアインシュタイン凝縮体を用いた実験的研究を行っています。原子のスピン自由度を利用したボーズ凝縮（スピノルボーズ凝縮）では、磁氣的性質を反映した様々な量子状態が存在します。特に Rb 原子のスピン 2 状態では新しい磁気相の可能性が理論的に予測されていますが、安定的なボーズ凝縮体生成と微弱な磁場環境が必要で、磁気相は未だ決定していません [1]。近年、量子渦芯と凝縮体の間には磁気相の関係があるため、磁気相を反映した量子渦芯が形成されることが示され、特にスピン 2 では凝縮体が量子渦芯のどちらかに新奇磁気相状態の Cyclic 状態が生じると予想されています [2]。本研究では 10 ミリガウス程度の微小磁場中においてスピノルボーズ凝縮体を生成し、内部に発生させた特異な量子渦の生成と観測を目指しています。

量子渦生成方法には磁場もしくは光を用いる方法があります。本研究では微小磁場中のスピノル状態を用意するため磁場は使えず、光で凝縮体をかきまぜる「光スプーン法」を用います。これまでの磁気トラップ中の光スプーン実験とは異なり [3]、まだ実現されていない光トラップ中の光スプーン法による量子渦生成を行いました。図 1 に実験結果を示します（トラップ開放後に撮影、黒い部分が凝縮体の影）。ボーズ凝縮体の中心付近に量子渦芯が確認でき、スピン操作可能な光トラップにおける量子渦生成に初めて成功しました。

2012 年 4 月からは新しい所属に移り、新規実験装置を立ち上げ中です。旧装置で困難であった空間解像度の向上と環境磁場の能動的制御を新たに導入して、微小磁場環境における量子渦ダイナミクスの観測実現を目指しています。

[1] M. Ueda, "Fundamentals and new frontiers of Bose-Einstein condensation", World Scientific, Singapore (2010),

[2] M. Kobayashi, Y. Kawaguchi, and M. Ueda, arXiv:0907.3716.

[3] K. W. Madison, F. Chevy, W. Wohlleben, and J. Dalibard, Phys. Rev. Lett. 84, 806 (2000).



とうじょう・さとし

出身：大阪府

経歴：2003 年 京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了、京都大学大学院理学研究科博士研究員、学習院大学理学部助教を経て 2012 年より中央大学理工学部准教授。

今年の 4 月から新しい所属に移り、所属学生とともに研究用のモノ作りに励んでおります。最近はメンバーの成長を目の当たりにし、刺激の多い日々を送っています。

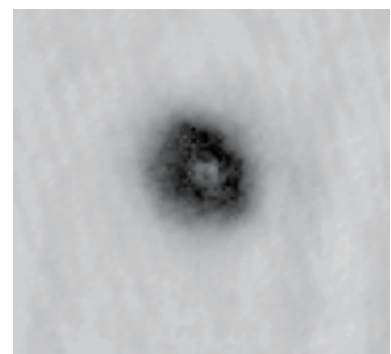


図 1：光スプーン法による量子渦生成。中空部は量子渦芯

## イオンを用いた超流動 $^3\text{He}$ 自由表面新奇現象の研究

池上 弘樹 / 理化学研究所 基幹研究所 専任研究員

私は、超流動  $^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$  といった量子液体の表面上あるいは表面下に蓄えられた 2次元電荷系を舞台とした研究を行っております。この系には 3つの側面があると思います。1つは、古典 2次元電子系としての研究対象、2つ目は電子系とヘリウム表面の結合により出現するダイナミクスを研究する舞台、3つ目はヘリウム表面を研究するためのプローブです。それぞれ異なった面白さがあります。また、液体ヘリウムと 2次元電荷系は共にとてもきれいな系なので、明確な実験結果が得られるという点も魅力です。この新学術領域では、3つ目の点から研究を行っています。

この新学術領域では、特に、超流動  $^3\text{He}$ -B 相の自由表面下に形成される表面束縛状態の観測を目指しています。B 相の表面には、B 相のトポロジカルな性質を反映して表面束縛状態が出来ますが、この表面束縛状態は、驚くべきことに、粒子と反粒子が等価なマヨラナ粒子的な性質を示すと予想されています。また、自由表面は乱れや不純物が無い理想的な表面であるため、表面束縛状態を研究するための最高の舞台と言えます。しかし、自由表面に形成される表面束縛状態を観測するための良いプローブはありません。私は、自由表面下にトラップされたイオン（正イオン、負イオン）がそのためのプローブになり得ないかという発想から研究を開始しました。特に、イオンの輸送特性の測定を行うことにより表面束縛状態の観測を目指しています。

また、時間反転対称性を破った状態である超流動  $^3\text{He}$ -A 相も興味ある対象です。A 相では、そのトポロジカルな性質の表れとして、イオンがその進行方向と垂直な方向に力を受けるといふ intrinsic Magnus 力というもの理論的に予想されています。この新学術領域では intrinsic Magnus 力の観測とその性質の解明、また intrinsic Magnus 力と A 相のトポロジーの関係性を明らかにしたいと思います。



いけがみ・ひろき

1999年東京大学大学院工学系研究科博士課程中途退学。2001年博士（工学）。1999年東京大学大学院総合文化研究科助手。その後、独立行政法人理化学研究所研究員を経て、現在、専任研究員。趣味はドライブ。

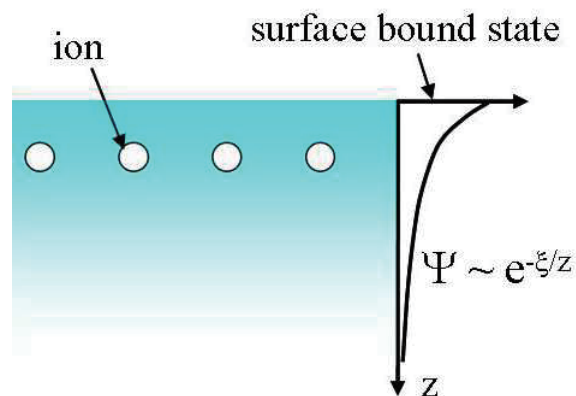


図1：超流動  $^3\text{He}$  の自由表面と表面下にトラップされたイオン



## 高分解能スピン分解 ARPES によるトポロジカル絶縁体における微細電子構造の研究

佐藤 宇史 / 東北大学 大学院理学研究科 准教授

トポロジカル絶縁体のスピン分解角度分解光電子分光 (angle-resolved photoemission spectroscopy: ARPES) 実験を行っています。電子は「エネルギー」「運動量」「スピン」という自由度を持っていますが、スピン分解 ARPES という手法は、この物理量のすべてを決定できる非常に強力な実験手法です。しかしながら、これまでは効率の低さのため肝心のスピン検出が大変難しく、トポロジカル物質をはじめとする新機能物質の電子状態解明に向けて大きな障害となってきました。この問題を克服するため、数年前から東北大学において「スピン分解高分解能光電子分光装置」(図1)の開発を行い、様々な改良の結果、スピン分解時において 8 meV という世界最高のエネルギー分解能を達成しました。現在、この装置を用いて様々なトポロジカル絶縁体やその候補物質の電子状態を決定するための研究を行っています。

C01 班の大阪大学の瀬川・安藤グループと共同で、幾つかの新種のトポロジカル絶縁体の同定や、トポロジカル転移に伴う電子状態の変化を捉えることに成功しています。例えば、トポロジカル絶縁体  $\text{TlBiSe}_2$  と通常の絶縁体  $\text{TlBiS}_2$  の固溶系である  $\text{TlBi}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$  では、 $x=0.5$  においてトポロジカル量子相転移が起こる事を明らかにし、さらにトポロジカル相では時間反転対称性を明示的に破らずともディラック電子が質量を獲得する事を見出しました。また、 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$  においては、バルクを絶縁体に保ったままでディラック電子のキャリア符号や表面バンド構造を制御できることがわかりました。より最近では、40 年以上前から研究されている  $\text{SnTe}$  という物質が、2重のディラックコーンを持つ新種のトポロジカル物質「トポロジカルクリスタル絶縁体」であることを同定しました(図2)。今後は、これらのトポロジカル物質や新型のトポロジカル絶縁体候補物質の電子構造をスピンにまで分解して精度よく決定し、物性発現機構に密接に関係する基盤電子構造を明らかにしていきたいと考えています。



さとう・たかふみ

秋田県出身。東北大学大学院理学研究科博士後期課程修了。現在、同研究科准教授。料理が趣味。調味料の微妙な配合が実験家の腕の見せ所。

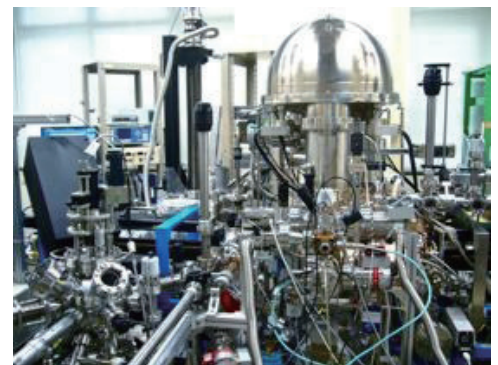


図1：超高分解能スピン分解光電子分光装置

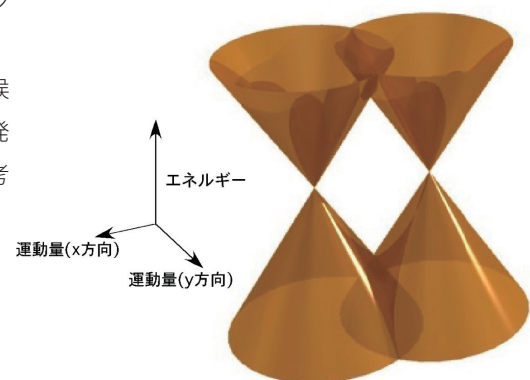


図2：SnTe の二重ディラックコーン状態

## $p, f$ 電子系トポロジカル超伝導の探索

村中 隆弘 / 電気通信大学 情報理工学研究科 先進理工学専攻 准教授



むらなか・たかひろ

本公募研究では、 $p$  電子或いは  $f$  電子が主な役割を果たす系において、空間反転対称性の破れた結晶構造を有する新超伝導体の開発を目的としている。本公募研究期間中に目的とする超伝導体の発見には至らなかったが、これまでに発見した3つの系の超伝導物質について報告する。

### ① 擬2元系 $AlB_2$ 型化合物

$AESi_2$  (AE: Ca, Sr, Ba) で表される物質群は、Si サイトへの遷移金属置換により  $AlB_2$  型構造を示す。Cu 置換系  $Ba(Cu_xSi_{2-x})$  は  $0.2 \leq x \leq 0.8$  において  $AlB_2$  型構造を形成し、 $x=0.3$  において最大  $T_c=3K$  となることを発見した [1]。また、Cu 置換濃度の上昇に伴って  $T_c$  は減少する。この系は Si サイトへ Cu がランダムに置換された  $AlB_2$  型構造であるが、ある置換濃度では SrPtAs ( $T_c=2.4K$ , KZnAs 型構造 SG:  $P6_3/mmc$ ) に見られるような、Cu と Si が蜂の巣型格子を規則的に占有しローカルに空間反転対称性を破る可能性も考えられる。

### ② MAX 化合物

MAX 相と呼ばれる物質群は  $M_{n+1}AX_n$  ( $n=1\sim3$ ) (M: 遷移金属, A: Al, In, Sn 等, X: C, N) の組成式で表され、 $n=1$  の場合、 $M_6X$  ブロックと A 層が積層した  $Cr_2AlC$  型構造 (SG:  $P6_3/mmc$ ) をとる。この系では  $Nb_2InC$  ( $T_c=7.5K$ ) などいくつかの超伝導物質が報告されているが、M サイトへ遷移金属元素が置換された超伝導体は報告されていない。特に、M サイトへの Y や Lu 置換は理論計算から否定されていたが、我々は  $Lu_2SnC$  の合成に成功し  $T_c=5.2K$  で超伝導転移を示すことを明らかにした [2]。バンド計算からは、 $E_F$  近傍の状態密度の関係から Lu  $d$  電子が重要な役割を担っていると考えられる。

### ③ Ga クラスター化合物

空間反転対称性の破れた  $Co_2Ga_9$  型構造 (SG: Pc) をはじめとする2元系 TM-Ga 化合物は遷移金属を内包した Ga クラスター構造を持ち、その中でも8つの Ga 元素の共有結合によって形成される anti-prism 型構造が、その構造安定性に重要な役割を担っている。この特徴を有する  $PaGa_5$  型構造 (SG:  $I4/mcm$ ) の化合物に着目したところ、 $NiGa_5$  ( $T_c=3.5K$ ),  $PdGa_5$  ( $T_c=2.3K$ ) を発見した。バンド計算からは、 $E_F$  近傍の状態密度の関係から Ga の anti-prism 型構造が重要な役割を担っており、さらに、両物質における  $T_c$  の違いは内包される遷移金属元素の状態密度の違いによって生じていると考えられる。

### 参考文献

- [1] K. Inoue *et al.*, Physics Procedia 27, 52-55 (2012).  
[2] S. Kuchida *et al.*, proceedings in ISS2012.

富山県出身。2003年青山学院大学理工学研究科修了 博士(理学)。2003年4月から青山学院大学理工学部 PD、助手、助教を経て、2012年4月より現職。2012年4月より現職。

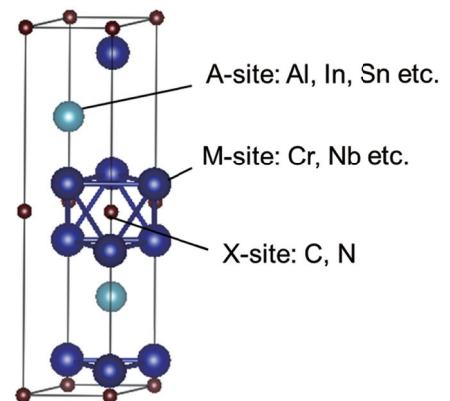


図1:  $Cr_2AlC$  型構造

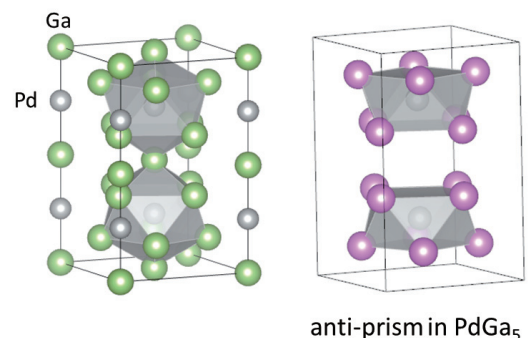


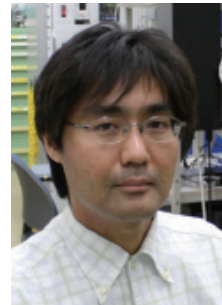
図2:  $PaGa_5$  型構造

## イリジウム酸化物薄膜を舞台としたトポロジカル絶縁体の物質開発

松野 丈夫 / 理化学研究所 基幹研究所 専任研究員

5d 電子系であるイリジウム酸化物は、スピン - 軌道相互作用が約 0.5 eV と大きく、かつ電子相関とも競合するという特徴を持ちます。このことから、「電子相関の効いたトポロジカル絶縁体」という物質の新たな状態が生まれる可能性が理論的に指摘されています。本研究では既知の物質にとどまらず、人工的に構造を制御したイリジウム酸化物薄膜を基軸とした物質開発を行い、トポロジーと電子相関との協奏を実現することを目的としています。

スピン - 軌道相互作用と電子相関との競合は、従来歴的であると信じられてきたイリジウム酸化物に予想外の基底状態を実現させることが近年明らかになってきました。一例として、二次元的構造をとる  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  がモット絶縁体となることが示され、注目を集めています。一方、その三次元版である  $\text{SrIrO}_3$  は格子歪みとスピン - 軌道相互作用の結合により半金属となります。これらモット絶縁体と半金属を含む電子相関の理解は、スピン - 軌道相互作用と電子相関の関わりを明らかにする上で不可欠です。本研究では、 $\text{SrIrO}_3$  と  $\text{SrTiO}_3$  からなる人工超格子薄膜  $[(\text{SrIrO}_3)_m, \text{SrTiO}_3]$  を  $\text{SrTiO}_3(001)$  基板上に作製し、 $m$  を変化させることで次元性を制御しました (図 1)。人工超格子ではバルク試料と異なり  $m$  を自由に制御できますので、電子相関を幅広く探索することが可能です。このような原子レベルで制御された超格子薄膜作製にはパルスレーザー堆積法を用いました (図 2)。最も二次元性の強い  $m = 1$  の試料は弱強磁性を示し、 $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  と同様のモット絶縁体であることが明らかとなりました。 $m$  の増加、すなわち次元性の増大に伴い磁気転移温度は低下し、 $m = 4$  においては磁気転移が観測されませんでした。すなわち、次元性制御によるモット絶縁体相の消失が実現しました。これは、スピン - 軌道相互作用と電子相関の双方が重要となる系の電子相の制御として初めての例であり、電子相関の効いたトポロジカル絶縁体に向けて大きな一歩となることが期待されます。



まつの・じょうぶ

2001 年 東京大学大学院理学系研究科修了、産業技術総合研究所博士研究員等を経て、2005 年理化学研究所研究員、2008 年より同専任研究員。最近はすっかりご無沙汰ですが、学生時代に茶道をかじっておりました。

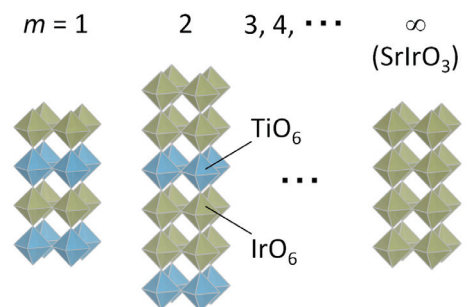


図 1 : 人工超格子  $[(\text{SrIrO}_3)_m, \text{SrTiO}_3]$  の結晶構造

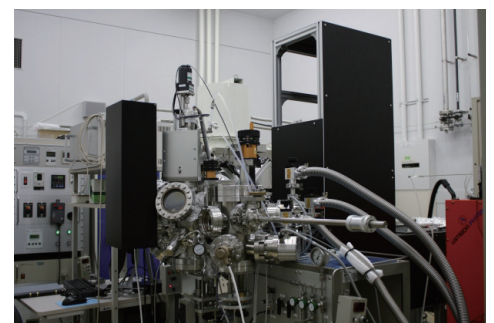
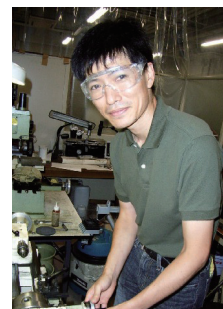


図 2 : パルスレーザー堆積法による薄膜作製装置

## 分光イメージング走査型トンネル顕微鏡による トポロジカル絶縁体の研究

花栗 哲郎 / 理化学研究所 高木磁性研究室 専任研究員



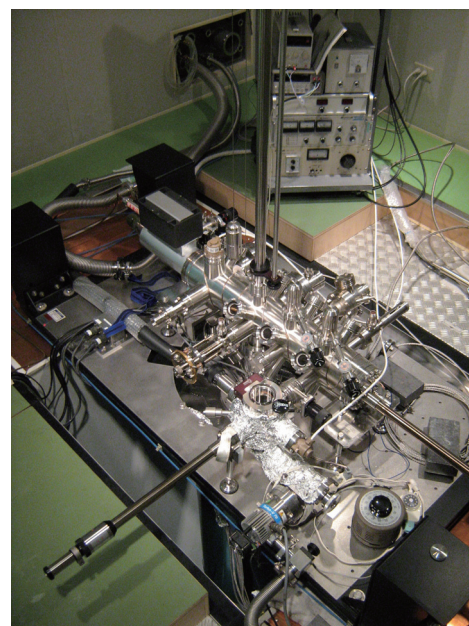
はなぐり・てつお

東京都出身。東北大学で学位取得。東京大学勤務を経て理化学研究所でSTMを使った研究に従事。近々、物性計測のプロ集団を目指す新チームを立ち上げ予定。趣味は、実験、自転車、山、居酒屋一人酒。

走査型トンネル顕微鏡 (STM) は、表面の構造を原子分解能で調べることができるだけでなく、サブ meV のエネルギー分解能で「電子状態の地図」を作成することが可能な、強力なツールです。実際の STM 実験には、様々な高度な技術が要求され、「実験おたく」を自認する私にとって大変魅力的な手法です。この 10 年ほど、超高真空極低温強磁場という多重極限環境で動作する超高安定な STM の開発と応用に従事し (図)、主に、高温超伝導体の超伝導ギャップの研究を行ってきました。本新学術領域研究では、これまで培った STM 技術を利用して、トポロジカル絶縁体表面のディラック電子の性質を調べています。

電子系に磁場を印加すると、ランダウ量子化によって、電子の取りうるエネルギーは離散化されます (ランダウ準位)。通常、ランダウ準位のエネルギーは磁場に比例しますが、ディラック電子では最低エネルギーの準位は磁場に依存せず、その他の準位は磁場の平方根に比例することが期待されます。我々は、典型的なトポロジカル絶縁体である  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の表面ディラック電子のランダウ量子化をトンネル分光で調べ、これらの特徴をとらえたほか、ランダウ準位の空間分布を描き出すことにも成功しました。さらに、最近、 $\text{Sb}_2\text{Te}_2\text{Se}$  の最低ランダウ準位が、わずかに磁場依存性を持っていることを発見しました。この異常は、電子スピンと磁場の相互作用、すなわちゼーマン効果によるものです。ランダウ準位に対するゼーマン効果はグラフェンでも見つかっていますが、この場合は上向きと下向きのスピンをもつ 2 種類のディラック電子があるために、ランダウ準位は磁場で分裂します。一方、 $\text{Sb}_2\text{Te}_2\text{Se}$  では準位の分裂は観測されず、磁場とともに準位エネルギーは単調にシフトしました。この結果は、トポロジカル絶縁体表面のディラック電子にはスピン縮退が無いことを明確に示しています。

今後、ディラック電子の磁場中での性質の研究に加え、不純物効果や、超伝導体や強磁性体との接合界面の電子状態の研究を展開していきたいと考えています。



図：開発した多重極限走査型トンネル顕微鏡

## トポロジカルな欠陥に局在するマヨラナ・ゼロモードと指数定理

福井 隆弘 / 茨城大学 理学部 教授



ふくい・たかひろ

超伝導中の渦糸の近傍に現れるゼロモードの有無を指数定理という強力な数学的手法を用いて調べることが最初の目的でした。実際に研究を始めてみると、どちらかという指数定理そのものに力点を置いた研究となりました。以下、この2年弱にわたる研究の幾つかを振り返りたいと思います。

物質のトポロジカル相に関する研究の醍醐味はその普遍性にあると考えています。最初の研究は、あまり物性ではなじみがないですが、中性子星など超高密度のクォーク物質において発現していると考えられているカラー超伝導に関するテーマに取り組みました。ここで安定に実現するであろう非可換渦糸の周りのマヨラナ・ゼロモードを詳細に調べました。

渦糸を考える限りは、無限遠方で「丸い」系を考えれば良いですが、マヨラナ状態を実際に実験的に実現するためには、渦糸よりもむしろヘテロ構造に基づいた $\pi$ 接合系等の方が容易であると考えられます。こういった系では秩序変数は遠方でも必ずしも丸くはありません。次の研究として、**図1**の系に対して指数定理でゼロ状態を探りました。左右の磁場をコントロールすると、 $\pi$ 接合系に現れるマヨラナ・ゼロモードに加えて、一般には有限質量励起モードも系全体のゼロ・エネルギー状態となり得ることを示しました。

このような「四角い」境界条件に対しても指数定理が実用上十分に機能することが分かったので、次の課題としてバルク・エッジ対応の一般的証明を指数定理の応用として行いました。**図2**のように異なるチャーン数を持つバルク状態のある境界で滑らかにつながり合わせた場合に、境界にエッジ状態が現れますが、このエッジ状態の個数と2つのチャーン数との関係を指数定理で導きました。

最近、本科研費研究グループの一員である東北大グループを中心として、トポロジカル絶縁体と普通の絶縁体を交互に積み重ねたヘテロ構造物質の実験が行われ興味を引いています。この実験に触発され、また**図2**の拡張として**図3**の状態に興味を持つに至りました。現在では、これをモデル化しそのトポロジカルな性質を調べています。

長野県出身。1987年京大理卒、1992年京大博修了。大学院までは核理論が専門。しばらく前に研究のための体力・健康維持を目的にジョギングを始めましたが、はまってしまい、今では逆に健康を書し、研究時間を削って走っています。

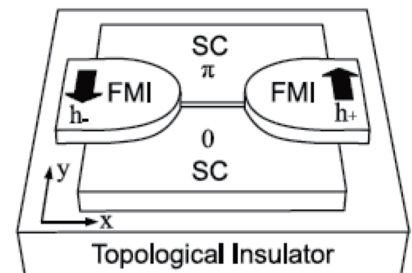


図1：ヘテロ構造 $\pi$ 接合系

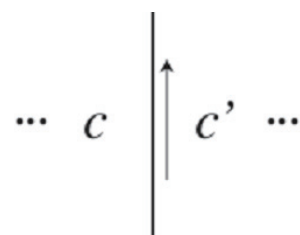


図2：バルク・エッジ対応

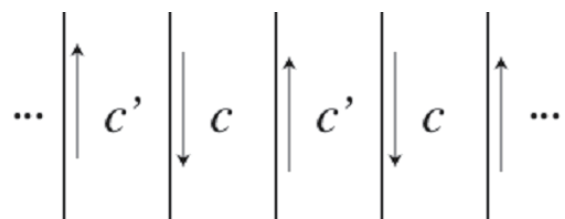


図3：2種類のトポロジカル物質の超格子系

## 対称性の破れた磁性体・超伝導体ナノ接合系における量子輸送理論

川畑 史郎／産業技術総合研究所 主任研究員

近年、対称性の破れた微小超伝導接合を舞台としてトポロジカルに非自明な量子状態の実現を目指した研究が盛んに行われています。本研究では、時間反転対称性の破れた磁性体／超伝導接合に現れる異常な量子輸送現象の理論構築とその応用を目指して研究を進めてきました。具体的には以下のテーマに関して研究を行いました。

### [1]「超伝導体／磁性体接合における奇周波数クーパー対とその検証法の提唱」

磁化が非一様な磁性体と超伝導体を接合した系においては、磁性体中にスピントリプレット奇周波数クーパー対が誘起されることが理論的に予言されてきました。本研究では、磁性体中の準粒子状態密度に表れるゼロエネルギーピークを観測することによって、奇周波数クーパー対の存在を実験的に検出できることを示しました。

### [2]「磁性半導体・超伝導接合を用いた電子冷却器」

量子デバイスや検出器を冷却する技術として金属／絶縁体／超伝導体接合 (NIS) 冷却に関する研究が注目を集めています。しかしながら超伝導金属界面におけるアンドレーフ反射のために冷却効率が期待したほど増大しないという深刻な問題がありました。そこで、絶縁体の代わりに磁性半導体スピンフィルターを用いることによって、アンドレーフ反射が抑制され、通常 of NIS 冷却器の理論限界を 5 倍程度上回る冷却性能が引き出せることを示しました。

本領域のサポートにより、国内外の多くの研究者と議論をする機会が得られたことは大きな収穫でした。今後もこれまでの研究をより一層発展させて行きたいと思っています。



かわばた・しろう

鹿児島県出身

1998 年大阪市立大学博士課程修了。

1998 年電総研研究員

2000 年産総研研究員

2005 年産総研主任研究員

現在に至る。

趣味：エスプレッソコーヒー

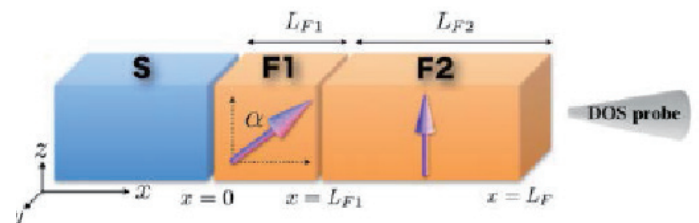


図 1：奇周波ペアを検出するための磁性体／超伝導接合

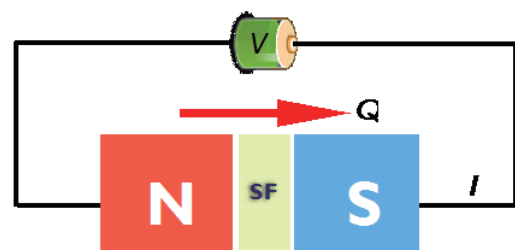


図 2：電子冷却器

## 超流動 $^3\text{He}$ の境界と渦における新奇的な状態の探索と同定

高木 丈夫 / 福井大学 大学院工学研究科 教授

アドバルーンや、風船に入っているヘリウム (He) ガスは、絶対温度 4K まで液化せずに気体のままでいます。さらに、2K より低温では、ボーズ凝縮を起こして、超流動状態となります。この性質は質量数が 4 のボーズ粒子である  $^4\text{He}$  のものです。このほか自然界には、質量数が 3 のフェルミ粒子である  $^3\text{He}$  があります。これは、3mK 以下の低温でクーパー対 (粒子対) をつくってボーズ凝縮を起こします。もともとがフェルミ粒子ですから、クーパー対を作ってボゾン化してボーズ凝縮をするわけです。この辺の事情はフェルミ粒子である金属中の電子がクーパー対を作って超伝導になる事情とおなじです。

さて、この  $^3\text{He}$  のクーパー対なのですが、角運動量を持つことが確定しています。特に超流動 A 相と呼ばれる相では、その角運動量が陽に現れる状態になっています。ところが、この角運動量が「観測に掛かるかどうか」が、超流動  $^3\text{He}$  が発見されて以来の未解決の問題となっています。角運動量を持っているといっても、分子レベルでコマのように回転をしているならば、(図 1) 容易に観測されるはずですが、運動相関する原子の距離が 10nm から 100nm の範囲に広がっていると、クーパー対どうしの干渉効果もあり、話は簡単ではありません。また、クーパー対の生成はフェルミ面近傍での粒子相関の変調で起こるわけですが、その効果がフェルミ面内部まで及ぶかどうか、という問題も同時に抱えているわけです。

これらの問題を解決する実験方法：超流動  $^3\text{He}$ -A 相を回転して A 相の折り目構造を変調して NMR 振動数の回転依存性を測定する、という方法を提案しました。現在、東大物性研で実験が続けられていますが、クーパー対の全モーメントが観測される、という状況が有力なようです。 $^3\text{He}$  の他にも、超伝導物質でもクーパー対の角運動量が陽に出現すると思われる物質が見つかっていますので、 $^3\text{He}$  と併せて、研究の発展が期待されます。



たかぎ・たけお

青森県藤崎町出身。  
東北大理卒、名大理院修了、  
現在福井大学工学部教授。  
趣味：電子回路製作、ヘタなテニス、散歩、食べ歩き  
近況：北陸は冬になって、外出には不向きの天気になりました。青空と太陽が恋しいです！



図 1：クーパー対の角運動量はコマの  
そのように観測可能か？

## 素粒子論的手法によるトポロジカル励起の研究

新田 宗土／慶應義塾大学 日吉物理学教室 准教授

物理学の分野において、トポロジーの重要性が増してきています。トポロジーとは大きさや形にはこだわらない繋がり方のみを対象にした柔らかい幾何学です。(例えば、A駅からB駅まで行くのに、どれくらい時間がかかるかは無視して、行けるかどうかや何通りの行き方があるのかを考えるのはトポロジーの問題です。)物理学とは言っても様々な分野があるのですが、私の場合は物性理論の研究と素粒子論の研究を並行して行っています。一方で得られた知識を他方に適用したり、またその逆にフィードバックすることで、分野によらない新しい理解が得られることもあります。

特にその中でも、渦などの位相励起の研究を行っています。まず、渦とは、皆さんも日常よく目にするあの渦です。台風や竜巻、あるいはお風呂の水を流した時に出来る渦です(図1)。しかし、ここで言う渦は「量子化された渦」です。どういうことかと言うと、普通の水などとは違い、ヘリウムなどを非常に低温にすると、超流動という状態になります。その場合は、粘性のないさらさらの流れが実現します。これをかき混ぜてやった場合に出来る渦は、量子化されているのです。もう少し詳しく言うと、循環という、流れがどれだけクルクル回っているのかを表す量があります。通常の渦はこれがどのような値でもよいのですが、量子渦ではこれが決まった(とても小さな)値の整数倍しか許されません。この背後には、 $\pi_1$ という量が関係しています。杭にロープが何回巻きつけて結ぶことを考えると、整数回しかあり得ませんね。この回数を表すのが $\pi_1$ です。同じような状況が超伝導体でも実現します。通常は金属に電流を流すと、抵抗がありますが、極低温に冷やしてやると超伝導状態になり、抵抗がゼロで電流が流れるようになります。この超伝導に磁場をかけてやると、磁場が侵入するのですが、決まった値の整数倍の磁場でしか存在できません。これも実は渦です。ただし、超流動の渦とは違って、この場合は渦の中に磁場が閉じ込められていて、量子化された磁束とも呼びます(磁束量子の構造に関しては文献1の図2を参照)。このような渦や、次元を一般化し $\pi_n$ で分類されるトポロジカル欠陥の研究を行っています。

[1] H. F. Hess, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 62, 214 (1989).



につた・むねと

出身 大阪府

経歴 大阪大学大学院卒業、東京工業大学、アメリカ・パーデュー大学でポスドクを経て、現在にいたる。

趣味はデジカメなど。今年度は日々の授業から解放されて、伸び伸びと研究させていただいています。



図1：台風も巨大な渦

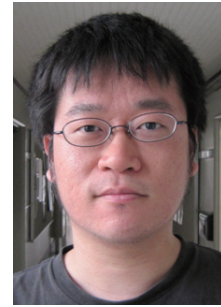


## 空間反転対称性の破れた超伝導体の渦糸状態における トポロジカル量子現象

横山 毅人 / 東京工業大学 大学院理工学研究科 助教

学生の頃は主に超伝導、特にメゾスコピック超伝導の研究をしていました。例えば、強磁性体 / 超伝導体接合ではスピン空間の対称性の破れによって超伝導体がスピンシングレットだとしても、強磁性体中に奇周波数（時間について奇関数の）トリプレットのクーパ対が現れるのですが、このクーパ対の性質を調べることが力を入れていたテーマの一つです。また、超伝導体の渦糸状態は並進対称性が破れた系とも言えますが、この対称性の破れによって新たに誘起された超伝導相関を明らかにし、渦糸系での電子状態との関係性を明らかにしました。東京大学にポスドクとして移ってからは、トポロジカル絶縁体の研究に注力し始めました。特に、トポロジカル絶縁体に強磁性体を接合した系におけるスピントロニクス効果や、超伝導体と接合した時に現れるマヨラナフェルミオンの性質を調べてきました。東京工業大学に助教として移ってからは以上のテーマを発展させつつ、新しい分野にも挑戦しようと日々考えています。

本領域では、超伝導接合系において対称性の破れによって誘起された奇周波数超伝導の示すマイルスナー効果を調べ、軌道帯磁率が系の温度などのパラメータに対して発散的かつ振動するような依存性を示すことを明らかにしました。これは奇周波数超伝導が磁場を排除しないことに起因しており、従来の超伝導とは全く異なる性質です。一方で、トポロジカル絶縁体に強磁性体を載せた系において磁化を時間的に変動させたときに現れる整流効果や、トポロジカル絶縁体の表面を流れる電流により表面に載せた強磁性体の磁化が反転可能なことも示しました。さらに、トポロジカル絶縁体に超伝導体を載せた系におけるジョセフソン効果や、トポロジカル絶縁体の表面に円偏光を照射した場合、逆ファラデー効果によって面直な磁化が誘起されることを示しました。また、トポロジカル絶縁体の表面に強磁性体を載せた系の示すネルンスト効果と熱ホール効果の一般的な定式化を行い、ペルティエ伝導度から表面 Dirac 電子の質量やベリー位相の構造を調べる方法を提示しました。



よこやま・たけひと

2008年名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了、2008年日本学術振興会特別研究員PD(名古屋大学)、2009年日本学術振興会特別研究員PD(東京大学)、2010年より東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻助教。運動不足を解消すべくプールに通っています。

## 二重人格を持つトポロジカル絶縁体表面の電子状態

井村 健一郎／広島大学 先端物質科学研究科 助教

トポロジカル絶縁体はバルク（内部）は通常の絶縁体と変わらないのに、表面は金属という言わば二重人格の物質です。さらに表面の金属状態はちょっと変わり者です。試料の「かたち」にとても敏感で、例えば細長くしてワイヤー状にすると、独りでその中をソレノイドが通っているかのような振る舞いをしてみせたり、あるいは球状（サイコロ状でもほとんど同じことですが）のナノ粒子状にしてやると今度は自然界には通常存在しないモノポール（磁気単極子）があたかもその中にあるかのような変わったスペクトルを示したりします。このように一方で、積極的・目立ちたがり屋の性質を示す反面、バルクには染み込んでいかないという「臆病な」ところもあります。私はこのようにちょっと変わり者で、母体であるトポロジカル絶縁体同様、二重人格を示す表面状態の研究をしています。

生命体や細胞と同じようにと言うと語弊があるかもしれませんが、固体中の電子にもそれぞれ「遺伝情報」のようなものがあって、それは我々が使用する有効モデルの中に「書かれて」います。トポロジカル絶縁体中の電子は、この遺伝情報がアインシュタインの相対性理論に従う電子と似ている、言わば「相対論的な遺伝子」を持つ固体電子です。遺伝情報は、試料の形状：表面の有無・位置（あるいはトポロジー）を決めて、有効モデルの従う量子力学的な方程式を解いてやることで「発現」します。こうして発現する遺伝情報の典型例が「金属的な」表面状態ですが、これを相対論の「ことば」で言うと、電子の有効質量が（例えば、光子のように）ゼロになるということになります。私はここ数年来の研究で、先程触れたトポロジカル絶縁体電子の外向的な方の性格：モノポールやソレノイドを実効的に誘起するという方の性格が、通常表面に閉じこもりがちで内向的と思われていた遺伝子から発現するという事を明らかにしました。またさらに最新の研究成果 [1] として、一見相反するとも思えるトポロジカル絶縁体電子の持つ二面性：内向的 vs. 外向的な性質が、実はむしろ表裏一体のものであることも分かってきました。

[1] K.-I. Imura, Y. Takane, arXiv:1211.2088.



いむら・けんいちろう

東京都文京区出身。1999年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。その後、ポスドク・助教として、パリ第11大学、理化学研究所、東京大学物性研究所、東北大学理学研究科等に在籍。



図：「内向的」トポロジカル絶縁体電子が外向的に転じる様（フラックスに沿ってバルクにしみ込む表面状態）。

## トポロジカル場の理論による新規量子現象の探索

田中 秋広 / 物質・材料研究機構 主幹研究員

統計力学で習う分配関数  $Z = \sum_{\text{配位}} W(\text{配位}) e^{-\beta E(\text{配位})}$  は、配位の重み因子  $W$  が通常正の実数ですが、中には複素数値となって配位同士がふるいに掛け合う（ベリー位相効果）変わった量子系があります。所謂「トポロジカル秩序」を持つ系ではこの効果は顕著で、古くは反強磁性鎖の Haldane ギャップの核心がここにあることが知られています。この量子効果の原因となる「ベリー位相項(トポロジカル項)」を含む有効理論を以下ではトポロジカル場の理論 = TQFT と呼ぶことにします。TQFT が生み出す物理から、抽象的に見えがちなトポロジカル秩序の姿をとらえるのが私のテーマです。

トポロジカル絶縁体の電磁現象には、電磁場の他にアクシオン場と呼ばれる自由度が登場し、その TQFT がマクスウェル方程式に重要な修正をもたらします。(熱伝導現象もアクシオン型 TQFT に支配されることを早くに指摘しました。) 実際、この系は多彩な表面量子効果が予言されていますが、いずれも試料表面をアクシオン場のドメイン壁と見なすことで簡単に導かれます。一方アクシオンは位相(角度)場であるため、渦糸も形成できるはずですが、渦糸はトポロジカル絶縁体と通常絶縁体の積層構造(ワイル半金属)等において実際に出現すると予想されますが、性質は殆ど調べられていません。本領域の井村氏やポスドクの菊池氏とともに調べた結果、**図1**のように、バルク - 渦糸間の電流フローが関与する一種の量子ホール効果が実現する様子が詳しく見えてきました。なお、渦糸の凝縮相もトポロジエの観点から興味深い物性を示すと予想されます。

また、本来 TQFT で記述されない「通常」の系を TQFT で表されるトポロジカル秩序のある系に「変換」させる方法も検討してきました。一例として連携研究者の井上氏と、レーザー照射下の通常絶縁体 (**図2**) が、トポロジカル絶縁体として振る舞うことを二次元系、三次元系の双方に対して確認しました。このようなトポロジカル秩序の人工創成は本領域でも研究が進行している冷却原子系の実験の進展と相まって世界的に活発化しています。



たなか・あきひろ

東京出身。1990年東大物工卒、原研特別研究生等を経て1999年博士(工学)。2000年科技厅金材技研(現物質・材料研究機構)入所。物性と異分野の交流に関心があります。

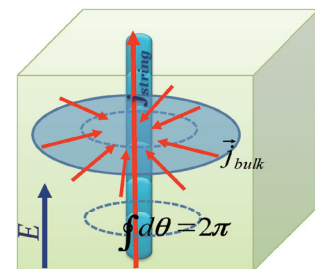


図1：アクシオン渦糸の量子ホール効果

図2：トポロジカル物質の人工創成に向けて

