

2018年度卒業研究発表会プログラム

発表10分+質疑応答5分

2/13 12号館 101室

開始時刻	研究室	発表者	発表タイトル	指導教員
10:00	宇宙実験	鈴木光	MEMS X線望遠鏡反射鏡表面の平坦化	江副祐一郎
10:15		湯浅辰哉	MEMS技術を用いたlobster eye X線光学系の研究	江副祐一郎
10:30		永利光	ブラッグ反射型偏光計を用いた鉄の特性X線における偏光の測定に向けた研究	江副祐一郎
10:45		鈴木暁	像再合成型X線光学系に用いるすだれコリメータの製作と測定	石田學
11:00		野村香菜枝	TES型X線マイクロカロリメータの性能向上に向けたマッシュルーム型吸収体の開発	江副祐一郎、大橋隆哉
11:20(30分間)	宇宙理論	山口純矢、片晶光	Kerr ブラックホールからの回転エネルギー引き抜き	政井邦昭
昼休み				
13:00	高エネ実験	鶴藤昌人	ARICH UpgradeのためのMPPCの信号読み出し集積回路の開発	角野秀一
13:15		在原拓司	T2K実験前置検出器アップグレードのためのキャリブレーションシステム	角野秀一
13:30		滝上和奏	新型 0 $\nu\beta\beta$ 崩壊検出器開発のための電場シミュレーション	角野秀一
13:45		三宅響	DCBA実験用チェンバースのチューブチェンバーを用いた増幅率の評価	角野秀一
14:05		山崎茜	初期宇宙における量子ゆらぎ	Sergey Ketov
14:20	高エネ理論	村山修一	Physics behind LIGO detection of gravitational waves from Black Holes (BH) mergers	Sergey Ketov
14:40	素粒子理論	植田郁海	QCDの漸近的自由性	安田修
15:00	原子物理	黒澤美貴	多環芳香族炭化水素負イオンの光電子脱離の波長依存性	飯田進平、田沼肇

2/13 12号館 102室

開始時刻	研究室	発表者	発表タイトル	指導教員
9:00	ナノ物性	中村健志	ESR手法を用いた $\beta'$ -(BEDT-TTF) <sub>2</sub> ICl <sub>2</sub> の電子状態の解明	坂本浩一
9:15		和田尚樹	WS <sub>2</sub> /WSe <sub>2</sub> 原子層ヘテロ構造の合成と界面発光	宮田耕充
9:30		安藤千里	NbSe <sub>2</sub> 薄膜の作製と電気伝導特性の評価	宮田耕充、中西勇介、真庭豊
9:50	電子物性	須藤江梨	カイラル構造をもつ $\alpha$ -IrSn <sub>2</sub> の単結晶育成と特異な輸送特性	青木勇二、東中隆二、松田達磨
10:05		千葉優馬	カイラルな結晶構造をもつIrGe <sub>2</sub> 単結晶育成と物性測定	松田達磨、東中隆二、青木勇二
10:20		平岡良太	Nd充填スクッテルダイトの高純度単結晶育成と電子輸送測定	松田達磨、東中隆二、青木勇二
10:35		坪田椋	Sm <sub>2</sub> Pt <sub>3</sub> Ga <sub>5</sub> 単結晶育成とその物性測定	東中隆二、松田達磨、青木勇二
10:50		酒谷瞭太郎	層状化合物Eu <sub>2</sub> Bi <sub>2</sub> S <sub>2</sub> F <sub>2</sub> の特異な局在現象と巨大な負の磁気抵抗	青木勇二、東中隆二、松田達磨
11:10	超伝導物質	勝野正著	InTe <sub>2</sub> 高压相の超伝導特性に対する元素置換効果	水口佳一
11:25		宇文浩	SnAs系層状超伝導体の元素置換効果	後藤陽介、水口佳一
11:40		宿南勇太	RE123系高温超伝導体の高エントロピー化による特性向上にむけた基礎研究	水口佳一
11:55		須藤健太	Ag(Bi,Sb)Se <sub>2</sub> 固溶体の結晶構造と熱電特性	水口佳一
昼休み				
13:00	強相関	堀川亮	層状超伝導体のギャップ関数とフェルミ面構造の関係	堀田貴嗣
13:15		香澤直輝	三角格子Potts模型の実空間くりこみ群解析	服部一匡
13:30		青木太一	くりこみ群を用いた $\phi^4$ 模型の解析	服部一匡
13:50	ソフトマター	寺田行宏	温度勾配下にある二分子膜中のLatex粒子の運動	栗田玲
14:05		篠原良子	くさび形セル中のゼラチン対流の速度場解析	栗田玲
14:20		森智哉	深度の異なる二領域をもつ系における歩行液滴の挙動	谷茉莉、栗田玲
14:40		生駒菜奈	直系の異なる高純度単一カイラリティナノチューブの精製	柳和宏、蓬田陽平
14:55		堀内加奈子	単層カーボンナノチューブの配列制御の研究	柳和宏
15:10	表面光物性	吉田栄里	フェルミレベル制御による熱電機構のクロスオーバー	柳和宏、蓬田陽平
15:30		藤田聖馬	二重井戸中のボーズ・アインシュタイン凝縮をした2成分粒子系の振る舞い	森弘之
15:45		井口義士	超流動ヘリウムとその励起状態	森弘之
16:00		高柳雄太	二粒子分光法によるBCS-BECクロスオーバー領域の対の性質の解析	荒畑恵子
16:15		横馬場優太	超伝導状態のスピンエンタングルメントエントロピー	大塚博巳
16:35	非線形理論	今田寛明	連成振動の断熱サイクル	田中篤司
16:50		中瀬光章	多準位 Landau-Zener モデルにおける拡散過程について	首藤啓
17:05		中原祥博	三角格子ローレンツガスにおける二段階緩和	首藤啓

座長は各研究室の教員にお願いいたします。なお、研究室の入れ替えに5分の間隔を取っています。

Abstracts

(A,C groups, 12-101 号室)

# MEMS X線光学系 反射鏡表面の平坦化

宇宙物理実験研究室

鈴木 光

X線は屈折率が1より小さいため、望遠鏡には全反射を利用した斜入射光学系が用いられる。また、大気で吸収されるため、衛星に乗せて宇宙で観測することが多い。衛星は重いほどコストがかかるため、MEMS加工技術を用いて超軽量のX線望遠鏡を開発している。Si基板に深掘りエッチング(DRIE)で貫通穴を開け、その側壁を水素アニールで平滑化してX線の反射鏡として使用する光学系である[1]。現在の光学系は側壁表面に凹凸があり、望遠鏡の性能向上のためにはその平坦化が必要である。解決手段としてアニールがあるが、大きいスケールでの平坦化は難しい。

そこで本研究では新しくケミカルドライエッチング(CDE)によるDRIE後の側壁表面の平坦化を試した。エッチングガス( $O_2$ ,  $CF_4$ )の比、加工量を変えながら実際に芝浦メカトロニクスと協力してCDE加工を行った。結果、 $O_2$ ガスの多い条件では0.1から200  $\mu m$ の各スケールで表面粗さが改善し(図1)、加工量を増やすことで大局的な構造も改善した(図2)。また、 $CF_4$ が多い条件も今後の加工量の調整で平坦化に使用できる可能性がある。以上からCDEは反射鏡の後処理に有効であるといえる。また、他の方法として液体をスプレーコートで膜付けし、液だれを利用して平坦化する方法も検討した。本発表では、これらの側壁平坦化の新たな取り組みについて述べる。

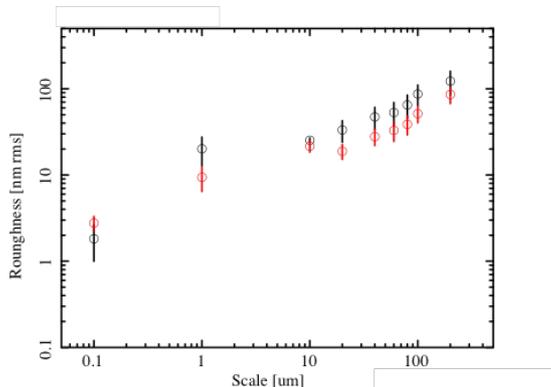


図1 CDE 前後の反射鏡表面のスケールごとの表面

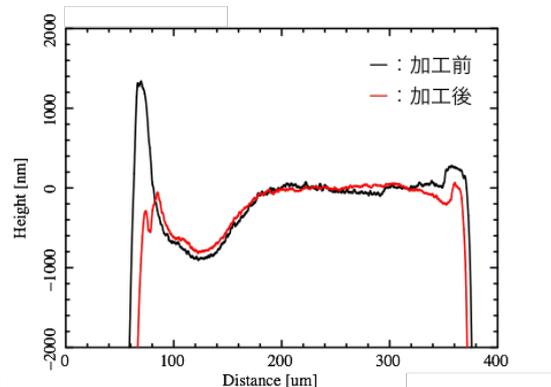


図2 CDE 前後の反射鏡表面形状

## 参考文献：

- [1] Ezoe et al. 2010, *Microsys. Tech.* 16, 1633

# MEMS 技術を用いた Lobster eye X 線光学系の研究

宇宙物理実験研究室

湯浅辰哉

宇宙 X 線観測では天体の画像を取得し、S/N を稼ぐための望遠鏡が使われる。従来の衛星観測で用いられてきた手法は回転放物面と回転双曲面でそれぞれ 1 回の全反射によって集光結像する Wolter I 型である。これと相補的な手法として、Lobster eye 光学系がある。甲殻類の目のような四角穴が格子状に並んだ構造で、垂直な壁での 2 回反射で集光結像する。Lobster eye 光学系は Wolter I 型に比べて、集光像が一点に集まらず十字を作るが、広視野を簡単に実現しやすいという利点を持つ。

本卒論では MEMS 技術を用いた Lobster eye 光学系の設計と製作を試みた。これまで我々のグループでは MEMS 技術を用いた Wolter I 型 X 線光学系を開発してきた。Si 基板にドライエッチングで微細穴を開け、高温アニールで側壁の平滑化を行い、高温塑性変形で球面状に変形する手法である [1]。同じプロセスを用いることで、Lobster eye 光学系の試作が可能であると考えられる。

私はそこで光線追跡シミュレーションを整えると共に、実際に Si 基板を用いた製作を試した。そして去年は Si 基板に格子状の微細穴を貫通させることに成功したものの、基板の表裏で穴幅に差があり、また変形で破損したのに対して、ドライエッチングではレシピと時間を変更し実施して、穴幅差を改善し、高温塑性変形では温度と荷重条件を変更して破損なく変形することができた (図 1)。今後は X 線照射による試験へと進みたい。



図 1.  
製作した MEMS Lobster eye 光学系。  
(直径 100 mm)

[1] Ezoe et al. 2010, *Microsys. Tech.*, 16, 1633

# ブラッグ反射型偏光計を用いた 鉄の特性X線における偏光の測定に向けた研究

宇宙物理実験研究室  
永利 光

X線天文学ではこれまで、空間分布、波長分布、時間変動の3つが主に観測されてきた。それに対し第4のパラメータである偏光は、観測機器の開発が技術的に困難なこともあり、1970年代にかに星雲から偏光を検出して以来、過去に有意な観測がほとんど行われていない。一方で、X線領域において偏光を観測することは、超新星残骸の磁場構造やブラックホール周辺の降着円盤の構造を解明する鍵になると考えられている。特に、それらの高エネルギー天体から生じる鉄輝線は、X線天文学において非常に重要なスペクトル情報であり、偏光を観測する意義は大きい[1]。

そのため、私は鉄輝線(6.4keV)付近に高い偏光検出能力を持つブラッグ反射型偏光計に着目し、シリコン単結晶を反射鏡として採用することを考えた。Si(100)結晶の(400)反射を用いると鉄の特性X線の反射角は $45.5^\circ$ となり、反射面に垂直な偏光成分がほぼ0になるため、高い感度で偏光を検出することができる。しかし、ブラッグ反射型偏光計は、ブラッグ条件を満たすバンドのエネルギーでなければ偏光を検出できないという欠点を抱えている。我々の研究室では、シリコン単結晶を用いたX線光学系に関する研究を行っている。私はその成果を応用することで、将来の有効面積の拡大および偏光計の軽量化に向けた開発につながると考えた。

そこで本研究では、まずSi(100)結晶の平板を用いて偏光を検出する実験の計画を作成した。この実験では、ブラッグ反射型偏光計による鉄輝線の検出を確認することに加え、X線発生装置のキャリブレーションを行うことを目的とした。また、二結晶分光器を利用して偏光度を高めることを考え、直接光の偏光度と比較する実験についても計画に含めた。今後、JAXA 宇宙科学研究所の30mビームラインにて実際に測定を行う予定である。

## 参考文献

- [1]R.Bellazzini, E.Costa, G.Matt, and G.Tagliaferri, “X-ray Polarimetry: A New Window in Astrophysics”, Cambridge University Press, 2010

# 像再合成型 X 線光学系に用いる

## すだれコリメータの製作と測定

宇宙物理実験研究室

鈴木瞳

我々は X 線望遠鏡の前にすだれコリメータを置くことで高角度分解能を達成する像再合成型光学系の開発を行っている。検出器の前に同一の周期構造を持つ 2 枚のスリットを一定の距離離して精度よく置くと、天体からの光子が検出器に到達できる方向とできない方向ができ、横軸入射角度、縦軸透過率を取るとスリット幅に応じた周期の三角波になる。入射角度に対する透過率の変化を利用し、複数のスリット幅で測定した情報から像を戻すのがすだれコリメータである。今回はスリット製作と X 線測定を行なった。

Al をマスクにドライエッチングで W を加工した。結果、穴幅  $80\ \mu\text{m}$ 、 $160\ \mu\text{m}$ 、 $320\ \mu\text{m}$ 、 $640\ \mu\text{m}$ 、 $1280\ \mu\text{m}$  のスリットの製作に成功した。(図 1)

測定は宇宙科学研究所 30m ビームラインで行なった。今回は①スリット 1 枚に X 線をあて、スリットの影による縞模様を確認、②スリット 2 枚を 60cm 離して置き、スリットへの X 線の入射角度を変えながら透過強度の変化の測定、を行なった。結果、①では縞模様が見え、スリット幅  $160\ \mu\text{m}$  では開口が設計値では 50% であることに対して透過率は 60% 程度であることがわかった。②では横軸入射角度、縦軸強度を取ると、 $160\ \mu\text{m}$  ではスリット幅から計算した値とほぼ等しい、周期  $0.032\ \text{deg}$  の三角波になっていることが確認できた。(図 2)

今後はパターンニングマスクの改善により、スリットの精度の向上、よりスリット幅の小さいスリットの製作を目指す。

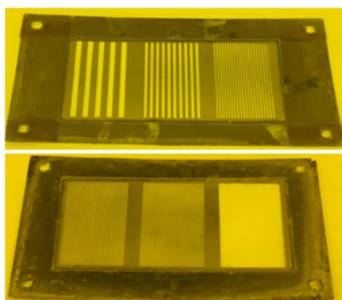


図 1 製作したスリット

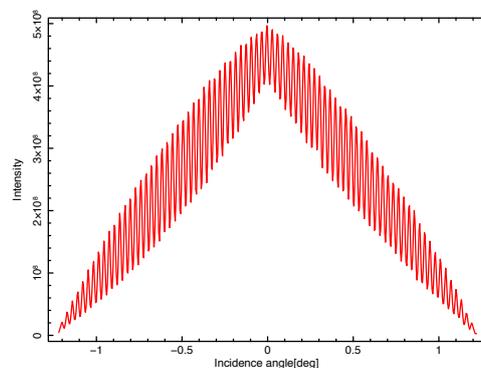


図 2 穴幅  $160\ \mu\text{m}$  スリットの X 線入射角度に対する透過強度

# TES 型 X 線マイクロカロリメータの性能向上に向けた マッシュルーム型吸収体の開発

宇宙物理実験研究室  
野村 香菜枝

我々のグループではダークバリオン探査を目的とする DIOS 衛星への搭載を目指し TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発を行っている。ダークバリオンは中高温銀河間物質 (WHIM) として分布していることが示唆されている。WHIM を検出するには高分解能と広視野の両方を備えた次世代の検出器が必須である。我々が開発している TES カロリメータはエネルギー分解能の向上と多素子化というステージから検出効率の向上へと向かっている。検出効率を向上するには開口率を高める必要があり、それを達成できるのにマッシュルーム型吸収体というものがある。吸収体がマッシュルーム型をしており TES と一部で接続し (stem 部)、TES よりも大きな面積 (top 部) を持つ吸収体である。

本研究では開発してきた  $20 \times 20$  積層配線 TES の STEM 型吸収体に top 部をつけ広視野というさらなる発展を目標とし、マッシュルーム型吸収体の製作プロセスの条件出しを行った。新しいレジスト (AZECL3027) を導入し AZECL3027 に適した露光時間・現像時間・ベーク時間を決定し、分解能と X 線吸収率の兼ね合いから高さ  $1.5 \mu\text{m}$ , stem  $120 \mu\text{m}$  角, top  $360 \mu\text{m}$  角の吸収体を製作した。

結果、プロセスの最中に高温に耐えられずレジストが発泡してしまう、吸収体周りのレジストだけ取れないなど問題が出てきた。レジストが綺麗に抜けた物を SEM (走査電子顕微鏡) で観察すると top 部が垂れてしまっていた。原因はレジスト AZECL3027 が高温プロセス中に何らかが変化しリムーバーで落ちづらくなっていることにあると考えられる。綺麗に形を保っている箇所もあり今後はイメージリバーサル中の温度や蒸着時間をマッシュルーム様に調整すれば改善できると考えている。

## 参考文献：

[1] 林 佑, 2015, 修士論文「TES 型 X 線マイクロカロリメータアレイの検出率向上を目指した多層膜 X 線吸収体の研究」, 東京大学

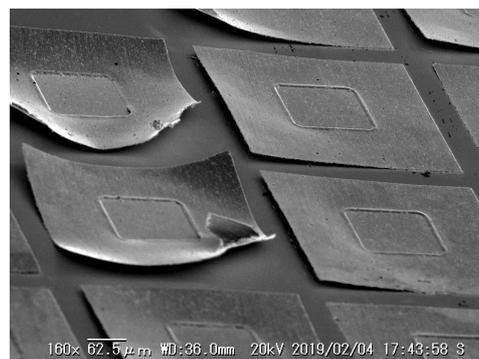


図 1 SEM による吸収体画像

# Kerr ブラックホールからの回転エネルギー引き抜き

宇宙理論研究室  
山口純矢、片晶光

銀河の中心部が、異常に明るく光っているものを活動銀河核という。この発表では、Blandford-Znajek機構による活動銀河核の説明を試みる。Blandford-Znajek機構とは、活動銀河核の原動力を説明するために1977年にR.D.BlandfordとR.L.Znajekが考案した、ブラックホールからのエネルギー抽出方法で、軸対称で定常的な時空を作るKerrブラックホールの回転エネルギーを、電磁場を用いて引き抜くというものである。

Blandford-Znajek機構を説明するために、まず時空の3+1分解を説明する。これによって、時空を時間一定の超曲面と、時間方向に分解して、四次元の方程式を、空間の3次元と、時間に関する方程式に分けて書き表す。

次に、Blandford-Znajek機構では、Kerrブラックホールによって曲げられた時空における電磁場を扱うので、一般相対論的電磁気学について説明する。最後に、Blandford-Znajek機構を説明する。

Blandford-Znajek機構は、Kerrブラックホール近傍で、Force-free条件を仮定する。Force-free条件とは、電磁場のエネルギーに比べ、プラズマの慣性が無視できるほど小さいときに成り立つ条件である。この条件下で、磁気圏の角速度が、イベントホライズンの角速度より小さいとき、ポロイダル磁場に沿って外向きのPoynting fluxが生成され、Kerrブラックホールの回転エネルギーをPoynting fluxとして引き抜ける、というのがBlandford-Znajek機構である。また、理想的な過程では、ブラックホールの回転エネルギーの約31%程度引き抜ける。銀河系のブラックホール、SgrA\*と比べると、Blandford-Znajek機構による放射は非常に小さいことがわかった。

## 参考文献：

- [1]岡崎淳一郎「特殊及び一般相対論 古典場の理論」 <http://www-astro.phys.se.tmu.ac.jp/users/okazaki/relativity.pdf>
- [2]山岸豊 「ブラックホールからの回転エネルギーの引き抜きと質量降着円盤との整合性」 2013年修士論文
- [3] R.D.Blandford,R.L.Znajek 「Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes」 1977MNRAS.179..433B

# ARICH Upgrade のための MPPC の信号読み出し集積回路の開発

高エネルギー実験研究室

鶴藤昌人

ARICH 検出器 (Aerogel Ring Imaging Cherenkov counter) は、Belle II 測定器を構成する検出器の一部であり、Belle II 実験において荷電  $K/\pi$  中間子の識別を行っている。荷電粒子が前段にあるシリカエアロゲル輻射体を通じた際に円錐状に発生するチェレンコフ光を、後段にある光検出器で二次元のリングイメージとして検出する。このリングの半径から荷電  $K/\pi$  中間子の識別を行う。

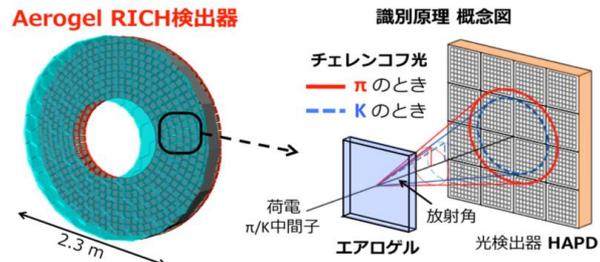


図 1：ARICH 検出器及び識別原理の図

現在 ARICH 検出器の光検出器には HAPD (Hybrid Avalanche Photo Detector) が採用されている。HAPD 上面の光電面へチェレンコフ光が入射すると光電子が放出され、この光電子に加速電圧  $-8\text{kV}$  をかけ HAPD 下面に設置された APD に衝突させる事で、約 1700 倍の電子打ち込み増幅が得られる。さらに APD 内部で Bias 電圧約  $300\text{V}$  をかけ、電子を約 40 倍に増幅させる (Avalanche 増幅)。よって全体では約 7 万倍まで増幅されることとなり、単一光子検出が可能である。

しかし、現在使用中であるこの HAPD は再生産が不可能な状況であり、今後 Belle II 実験において HAPD が予想以上に故障し、ARICH 検出器の運用に支障が出る場合に備えて、新たな光検出器を開発する必要性が出てきた。HAPD に代わる光検出器の候補の一つとして MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) がある。MPPC は APD をマルチピクセル化したものである。MPPC に、降伏電圧と呼ばれるある一定以上の電圧 (通常  $10\text{V}$ ) をかけて動作させると、電子の数が入射粒子の数に比例しない一定の出力が発生する。これをガイガーモードと呼ぶ。このようにして得られる増幅率は 100 万倍以上になる。

このように、MPPC は HAPD に比べ高い増幅率を持ち、また動作電圧が低いということが特徴の一部としてあげられる。

本研究では、この MPPC からの信号を読み出すための集積回路の開発のためのシミュレーションを行なった。シミュレーションを通して、アンプの増倍率及び出力電圧の線型性の検証、オフセット調整機能の検証を行った結果について報告する。

## T2K 実験前置検出器アップグレードのための

### キャリブレーションシステムの開発

高エネルギー物理実験研究室

在原拓司

ニュートリノは強い相互作用と電磁相互作用をしない中性の素粒子であり 3 種類のニュートリノが存在する。3 種類のニュートリノがそれぞれ別の種類のニュートリノに変化する現象はニュートリノ振動と呼ばれ、T2K 実験はこの現象を精密に測定し、ニュートリノ混合の完全な理解を目的とした実験である。

T2K 実験では茨城県の東海村にある J-PARC で大強度のニュートリノビームを生成し、岐阜県の旧神岡鉱山にあるスーパーカミオカンデ(SK)でニュートリノを検出する。T2K 実験には遠方検出器である SK と、ニュートリノ振動前のニュートリノのフラックスを測定するための前置検出器(ND280)の 2 つの検出器がある。

ND280 は現在アップグレード計画が進められており、その中の 1 つに Super-FGD という飛跡検出器がある。Super-FGD は荷電粒子が通過すると発光するプラスチックシンチレーターで作られた 1cm の立方体を 216 万个積み重ねた有感領域と 58800 個の光検出器から構成され、シンチレーター内で発光した光を波長変換ファイバーを通して 3 つの軸方向に設置した光検出器でそれぞれ測定し、荷電粒子の飛跡を 3 次元情報で取得する。

約 6 万個の光検出器が正しく動作していることを確認するために人工的に光をファイバーに入射することで光検出器のテスト行うキャリブレーションシステムが必要である。このシステムではファイバーに光を一様に入射させる必要があり、候補の 1 つとして導光板を用いた手法を開発している。導光板は一定の間隔ドット状の傷がつけられており、側面から入射した光を拡散させ、表面に一様な光を出すことができるパネルである。

本研究では縦 1m、横 10cm の導光板を用いて光量の一様性を評価した。結果として導光板の LED を当てている側から 20cm は非一様性を示しており、20cm から 90cm では一様性を確認した。また LED の発光箇所を増やし、導光板のドットに重ならないように LED を設置することにより、端から 20cm 未満の非一様性を小さくすることができた。

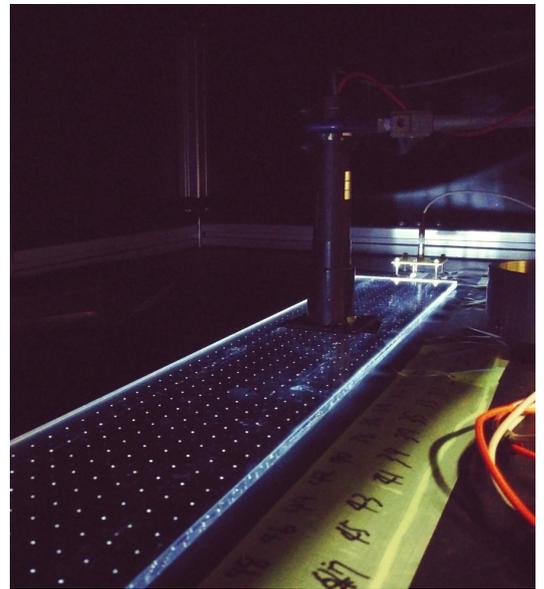


図 1：実験の様子(導光板と検出器)

# 新型 $0\nu\beta\beta$ 崩壊検出器開発のための電場シミュレーション

高エネルギー実験研究室

滝上和奏

素粒子の一つであるニュートリノは、電子と同じ、スピン  $1/2$  の粒子であるが、電荷が  $0$  であるため、粒子・反粒子の区別がつかないマヨラナ粒子である可能性がある。ニュートリノがマヨラナ粒子であることを証明するには、ニュートリノを放出せずに二重ベータ崩壊する  $0\nu 2\beta$  崩壊を検出しなければならない。本研究室では、これまで二重ベータ崩壊で発生する  $2$  本の  $\beta$  線を捉えるための DCBA 検出器を開発してきた。DCBA 実験では、検出器を  $\beta$  線の運動領域内に配置する必要があったため、ワイヤのような質量の小さいものを使う必要があり、構造上  $2$  次元の位置情報を  $2$  つ組み合わせることで、 $3$  次元の位置情報を再構成している。

本研究では、 $0\nu 2\beta$  崩壊の検出をより精密に行うために、検出器を  $\beta$  線領域外に置いて直接的に  $3$  次元の位置情報を取得できるように検出器の基本設計の変更を行う。

(図 1 DCBA、図 2 新しい検出器)

新型検出器は、ソースプレート(二重  $\beta$  崩壊する板状の放射線源)と並行になるように電場をかけるが、このように配置すると、一般的にはソースプレート付近の空間の電場は一様にはならず、電子のドリフト軌道が乱れ、 $\beta$  線の位置を正しく測定することができない。

電場を一様にするために、小さい電気伝導度を  $3$  枚のソースプレートに与え、わずかに電流を流すことで電場の乱れを防ぎ、ソースプレート付近で電場が一様になるようにした。

$3$  枚のソースプレートの電気伝導率を  $10^{-5} \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  と  $10^{-12} \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  に変化させ、シミュレーションし、ソースプレート内の電場が一様になっているか、 $2$  つに違いが見られるかを評価した結果、ソースプレート内は一様な電場となり、 $2$  つの電場にはあまり変化が見られなかった。電場の形状をみだすことなく、ソースプレートに対して平行に電場をかけることができる、と分かった。

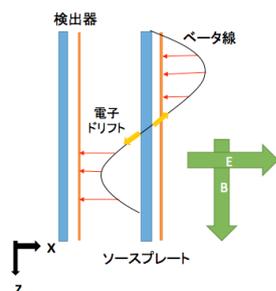


図 1 DCBA 検出器の読み出し

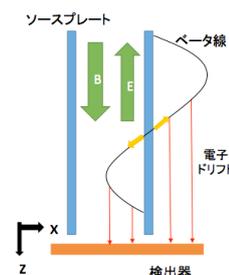


図 2 新しい検出器の読み出し

# DCBA 実験用チェンバーガスの

## チューブチェンバーを用いた増幅率の評価

高エネルギー実験研究室  
三宅響

電荷をもつレプトンとクォークはディラック粒子であり、粒子と反粒子が存在する。一方ニュートリノは電荷を持たないので、自身が反粒子であるマヨラナ粒子である可能性がある。ニュートリノがマヨラナ粒子であるということは、自身の質量が非常に軽い理由を説明する「シーソー機構」などの様々な理論の前提になっている。

ニュートリノがマヨラナ粒子であることは、ニュートリノレス二重ベータ崩壊観測で確認できる。ニュートリノレス二重ベータ崩壊とは、ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊である。通常二重ベータ崩壊は、ニュートリノが放出されてエネルギーを持ち去るため、二本のベータ線の運動量の和の分布は図1のようななだらかなものになる。一方ニュートリノレス二重ベータ崩壊ではニュートリノを放出しないため、 $Q$ 値付近に運動量和のピークが現れる。

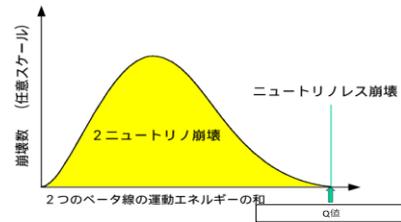


図1：二重β崩壊の二つのβ線の運動量

DCBA 実験ではドリフトチェンバーを用いて二本のベータ線の飛跡を検出し、エネルギーを再構成することでニュートリノレス二重ベータ崩壊の発見を目指す。飛跡検出によるエネルギー再構成の特徴は、ガンマ線などの中性バックグラウンドに不感であることや、二つのベータ線の電荷や運動量、崩壊点などの多くの情報を得られることである。しかしエネルギー分解能向上のためには装置内の物質量を小さくしなければならず、ヘリウムを主成分とするチェンバーガスを用いる必要がある。しかしながら DCBA 実験で使用する  $\text{He}(85\%)+\text{CO}_2(15\%)$  のガス増幅率は小さく、また実験的にもよく測定されていないという問題がある。

本研究では DCBA 実験で使用するチェンバーガス  $\text{He}(85\%)+\text{CO}_2(15\%)$  の増幅率を広く使われている P10 ガス ( $\text{Ar}(90\%)+\text{CH}_4(10\%)$ ) と比較しながらチューブチェンバーを用いて評価した。Garfield++ というガス検出器のシミュレーションソフトを用いてシミュレーションを行い、その後実際に測定を行ない比較した結果、放電領域よりも充分低い陽極電圧では、シミュレーションと一致することがわかった。

# 初期宇宙における量子ゆらぎ

高エネルギー理論研究室

山崎 茜

現在の宇宙には、恒星や惑星などの星から超銀河団まで様々な天体が存在する。これらの非一様な構造が生じるためには、初期の宇宙に種となる密度ゆらぎが存在したと考えられる。初期密度ゆらぎの生成機構に関しては未だ完全には解明されていないものの、有力視されている説として、インフレーション理論に基づく初期密度ゆらぎの生成がある。近年、WMAP 探査機や Planck 衛星などによる宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の観測により、この仮説を支持する観測的証拠が多数挙がってきている [1]。

今回の発表では、まず、現在の宇宙論及び標準ビッグバン理論[2]、インフレーション理論[3]について説明する。インフレーション期の量子ゆらぎが古典的なゆらぎとなり、現在の宇宙構造の起源となっていることを、[1]や[4]の観測的証拠に触れつつ確認する。

また[3]を参考に、スカラー場のインフレーション理論において、スカラー型の量子ゆらぎを通常の場合の量子化の手法に沿って求める。インフレーションを起こす場であるインフラトン場の量子ゆらぎの波長がハッブル半径を超えない間は、場の演算子の固有状態が大きく変化する量子的な状態といえる。しかし、量子ゆらぎの波長がハッブル半径を超えると、固有状態は時間的に不変になり古典的なゆらぎとみなすことができる。

## 参考文献：

- [1] 小松英一郎, Kavli IPMU News, (Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, 2018) Vol.41, p.32-p.37, -量子ゆらぎ-.
- [2] 松原隆彦, 『宇宙論の物理 上』(東京大学出版会, 2014) 315p.
- [3] 松原隆彦, 『宇宙論の物理 下』(東京大学出版会, 2014) 339p.
- [4] Planck Collaboration: Y.Akrami et al., arXiv: 1807. 06211 [astro-ph. CO], (2018)-Planck 2018 results. X. Constraints on inflation-

# Physics behind LIGO detection of gravitational waves from Black Holes (BH) mergers

高エネルギー理論研究室  
村山 修一

これまでに、アメリカの重力波検出器 aLIGO は約 3000km 離れた 2 台の検出器により質量 $10M_{\odot}$ から $80M_{\odot}$ までのブラックホールを重力波観測により発見した。ここでは理論的な観点から、重力波の伝播・検出を考察し、実際の LIGO の検出について考察していく。

アインシュタイン方程式を近似して簡単な形である弱い重力波でのアインシュタイン方程式を求めて、その方程式を用いて伝播してくる重力波を記述してみると、重力波は光速で進み、電磁波と同じように進行方向とは垂直な方向に振幅があり、その重力波によって、物質間の固有距離が振動するように変化することがわかる。

重力波が固有距離を変化させる性質を用いて、共鳴型検出器と呼ばれる 2 つの物質のあいだにばねをいれた、簡単な重力波検出器のモデルを考えることが出来る。その検出器は重力波が通過すると強制減衰振動をするが、その振動はとても小さく、検出するのは非常に難しい。

LIGO も固有距離の変化による強制減衰振動を利用して検出しているが、LIGO は装置の内部にレーザー光を通し、レーザー干渉によって重力波の検出をおこなっている。

## 参考文献：

- [1] Bernard F. Schutz (1988) 『シュッツ 相対論入門 下 ー一般相対論 ー』 江里口良治・二間瀬敏史訳、丸善株式会社
- [2] 田越秀行、中村卓志 (2016) 『重力波の初の直接検出とその意義』 日本物理学会
- [3] 『連星ブラックホール合体からの重力波の観測』  
<https://ligo.org/science/Publication-GW150914/science-summary-japanese.pdf>
- [4] 『Takeno-study』 <http://ugotake.my.coocan.jp/Miolab/laser.html>

# QCD の漸近的自由性

素粒子理論研究室

植田郁海

標準模型の中でもクォークとグルーオンの相互作用を記述している QCD(Quantum ChromoDynamics) は、クォークの閉じ込めのような低エネルギーにおける基礎物理を摂動論ではうまく記述できなくなる漸近的自由性という特徴を持っている。そこで本研究の目的は、なぜ QCD が低エネルギーで摂動論を使うことができず、漸近的自由性を持つのかを証明することである。

この証明は、QCD の発散している量子補正を次元正則化を用いて評価し、その発散量をくりこみという手法を用いて除去した後、結合定数のエネルギースケール依存性をくりこみ群の観点から調べることによって行なった。

その結果、結合定数はエネルギーに関する減少関数となり、漸近的自由性を持つことが確認できた。

この漸近的自由性によって低エネルギーでは結合定数が増大し、摂動論が破綻するので、クォークの閉じ込めのような低エネルギーでの物理現象では非摂動論的な研究が必要となる。

## 参考文献

- [1] Lewis H.Ryder, QUANTUM FIELD THEORY Second edition(CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS(1996))

# 多環芳香族炭化水素負イオンの光電子脱離の波長依存性

原子物理実験研究室

黒澤美貴

宇宙空間などの孤立環境における分子の緩和過程の研究は、星間分子の生成機構など、化学進化の詳細を明らかにするためにも重要である。中でも未同定の赤外線スペクトルの原因物質として有力な候補とされている多環芳香族炭化水素について、その負イオンの緩和過程を調べることは、原子分子物理学の研究テーマとして興味を持たれている。孤立環境下で電子親和力を超える過剰なエネルギーを持った分子負イオンは、電子脱離による素速い中性化、赤外線放出による遅い振動冷却、そして近年発見された再帰蛍光放出による速い電子緩和という3つの過程を取る可能性がある。本研究では多環芳香族炭化水素の一種であるペンタセンの負イオンについて、孤立分子状態での光電子脱離スペクトルを測定した。

実験には首都大学東京にある静電型イオン蓄積リング、TMU E-ring を用いた。TMU E-ring は内部の真空度を  $10^{-8}$  Pa 以下に保っており、内部で残留ガスとの衝突を抑えることができるため、数秒間程度イオンを蓄積することが可能である。レーザーアブレーションイオン源において、YAG レーザーの2倍波を固体ペンタセン試料に照射して分子負イオンを生成した。パルス的に生成されたイオンを15 kVの電位差で加速してリングに入射し、静電場によってリング内部を周回させた。ここでは、高周波を印加することでイオンビームのバンチ構造を保った。周回中のイオンに特定のタイミングでレーザーを照射すると、励起されたイオンは光電子脱離によって中性粒子化し、その中性粒子は静電場によって曲げられることなくまっすぐ進むため、周回軌道の外に設置されたMCP(マイクロチャンネルプレート)で検出される。

本研究では、OPO レーザーを用いることで様々な波長のレーザーを、イオンのリングへの入射後の時間を変えながらペンタセン負イオンに照射し、MCPで検出された中性粒子強度を測定した。測定された中性粒子強度の波長依存性は、孤立分子負イオンの光吸収スペクトルに相当する。このスペクトルが照射時間に依存することから、負イオンがリング内を周回中に冷却されていくことが示された。また、固体マトリックス中で観測されたスペクトル[1]との比較を行ったので、その結果についても報告する。

## 参考文献：

[1] T. Shida, and S. Iwata, J. Am. Chem. Soc., 1973, **95** (11), 3473-3483.

Abstracts

(B,D groups, 12-102 号室)

# ESR 手法による $\beta'$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>ICl<sub>2</sub> の電子状態の解明

ナノ物性研究室

15163031 中村健志

超低温、超高压という極限の環境下では通常では見られない物性が多く確認される。しかしそのような環境下で測定を行うことは困難であり、まだ測定されていない物性が多く存在する。物質の磁気的な性質を調べる手段として ESR 測定がある。本研究は、当研究室で開発してきた ESR 装置を用いて、8.2GPa の高圧力下で超伝導転移する  $\beta'$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>ICl<sub>2</sub> [1] の低温・高圧下での磁性を調べることを目的としている。

今回、この ESR 装置を用いて ESR 信号を常圧、300~5K までの温度範囲で測定し、初めて He 温度までの解析可能なデータが得られた。図 1 は実験で得られた  $\beta'$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>ICl<sub>2</sub> の ESR 信号の面積から求めた、常圧における磁化率の温度変化のグラフである。30K 以下では面積を正確に求められなかったが、それは反強磁性転移をしたため信号が弱くなったからだと考えられる。このことから反強磁性転移温度は 30K 以下だと考えられ、先行研究の 22K と矛盾しない。今後の課題として、その付近の温度でより正確な測定をすること、また各圧力下で He 温度まで測定することを目指したい。

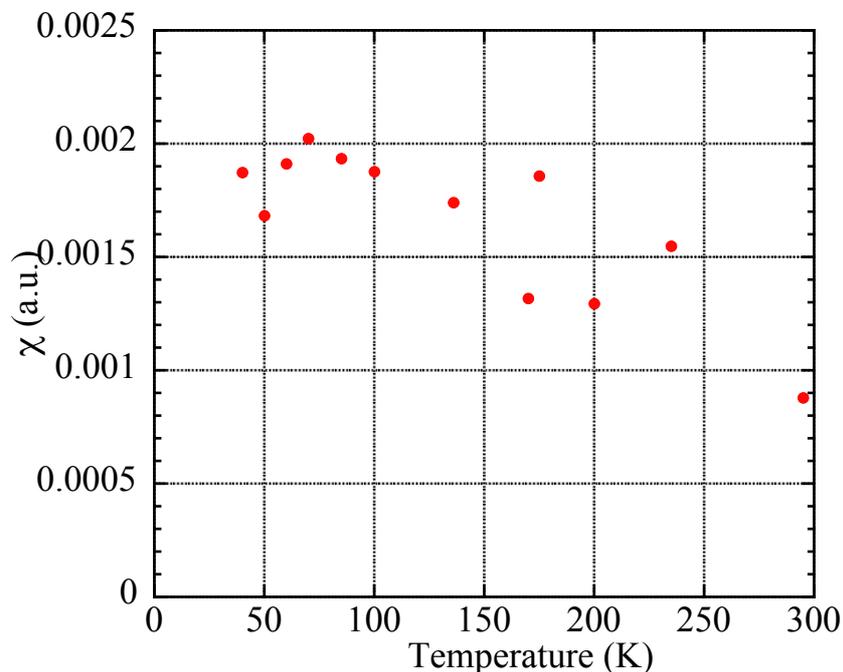


図 1: 常圧における  $\beta'$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>ICl<sub>2</sub> の磁化率の温度依存性

## 参考文献

[1] H. Taniguchi et al.

J. Phys. Soc. Jpn. 72 (2003) 468

## WS<sub>2</sub>/WSe<sub>2</sub>原子層ヘテロ構造の合成と界面発光

ナノ物性研究室 15163030 和田 尚樹

指導教員: 宮田 耕充、 真庭 豊、 中西 勇介

異なる原子層を接合した原子層ヘテロ構造は、その接合部に形成する一次元的な界面の物性や光・電子デバイス等への応用より、近年注目を集めている。特に、遷移金属カルコゲンナイド(TMDC)原子層は、3原子厚の層状構造と組成に依存した多彩な電子状態をもち、その面内ヘテロ構造は最も研究されている系の一つである。ごく最近、高口らは高品質な単層MoSe<sub>2</sub>/WSe<sub>2</sub>ヘテロ構造を合成し、その接合界面に特有の発光を報告してきた[1]。この報告では、接合部のバンド不連続によるキャリア閉じ込めに起因して層間励起子が形成し、界面発光として観測されたことが示唆されている。この仮説が正しければ、バンド不連続の大きな界面を持つヘテロ構造では、より効率的な層間励起子の形成が期待される。しかしながら、他のヘテロ構造で同様の界面発光が観測された例はこれまで報告されていなかった。

本研究では、大きなバンド不連続を持つ単層WS<sub>2</sub>/WSe<sub>2</sub>ヘテロ構造(図1a)に着目し、高品質試料の合成法の開発とその界面発光について調べてきた。試料は化学気相成長法(CVD法)を利用して合成した。石英管内部に2種類のカルコゲン原料(S,Se)を上流側に、金属酸化物(WO<sub>3</sub>)を下流側にそれぞれ設置し、不活性ガス下で加熱することでシリコン基板上にヘテロ構造を作製した。光学顕微鏡観察や発光強度マップ・スペクトルより、得られた30mm程度の三角形の結晶の内部にWS<sub>2</sub>、外部にWSe<sub>2</sub>が確認された(図1b-d)。さらに、イオン液体を用いた電気二重層発光ダイオードを作製し、WSe<sub>2</sub>にホール、WS<sub>2</sub>に電子を注入することで界面発光の観察に成功した(図1e)。本研究成果は、原子層ヘテロ構造の一次元界面における物性の理解や将来的なデバイス応用への展開が期待される。

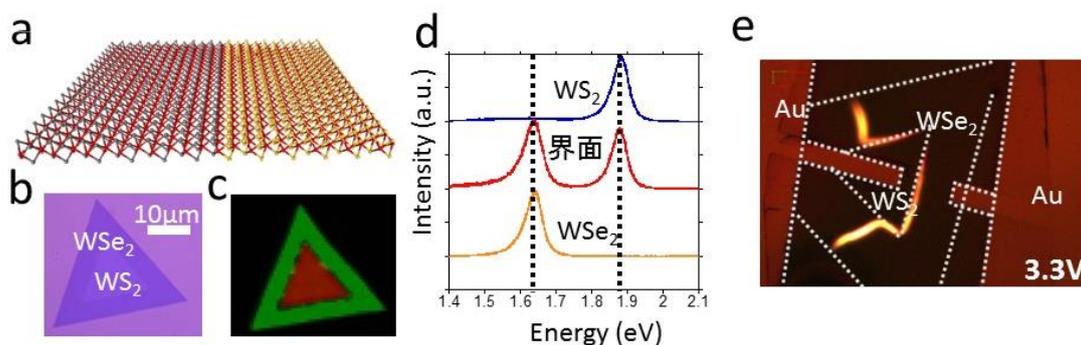


図 1: WSe<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> 面内ヘテロ構造の(a)構造モデル、シリコン基板上での(b)光学顕微鏡像、(c)発光強度マップ、(d)発光スペクトル、および(e)電界発光像。

[1] 高口裕平, 修士論文 (2018)

## NbSe<sub>2</sub>薄膜の作製と電気伝導特性の評価

ナノ物性研究室 15163050 安藤 千里

指導教員: 宮田 耕充、 中西 勇介、 真庭 豊

遷移金属ダイカルコゲナイドの原子層は、原子3個分という極薄の2次元構造と特異な電気特性を持つことから近年、注目を集めている。特に、NbSe<sub>2</sub>原子層は二次元超伝導体であり[1]、またオーミック接触用電極[2]の候補としても有望である。これまで、NbSe<sub>2</sub>原子層は剥離法やMBE法、CVD法などで主に作製されてきた。一方、薄膜のセレン化は成長の位置制御や膜厚制御の自由度などの観点から利点を持つ[3]が、これまでNb薄膜のセレン化に関する研究はほとんど報告されていない。本研究ではNb薄膜のセレン化によりNbSe<sub>2</sub>を作製し、その電気伝導特性の評価を行った。

本研究では、EB蒸着を用いてSi基板にNb薄膜を蒸着させた。Nb薄膜は、N<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>の混合気体下で、気化させたセレンを利用して800℃でセレン化を行った (Figure 1a)。Figure 1bにセレン化させた異なるNb膜厚試料のRamanスペクトルを示す。これらの試料は230 cm<sup>-1</sup>と240 cm<sup>-1</sup>付近にピークを示し、これらのピークは先行研究のNbSe<sub>2</sub>のE<sub>12g</sub>とA<sub>1g</sub>ラマンピークと一致している。E<sub>12g</sub>とA<sub>1g</sub>の振動数の差が膜厚が薄くなくとて大きくなっていくことが確認できる。これは、NbSe<sub>2</sub>の膜厚はNb薄膜の厚さにより制御できることを示唆している。さらに、得られた試料の電気特性は厚みにより変化することを見出した (Figure 1c)。詳細は、発表当日にて議論する予定である。

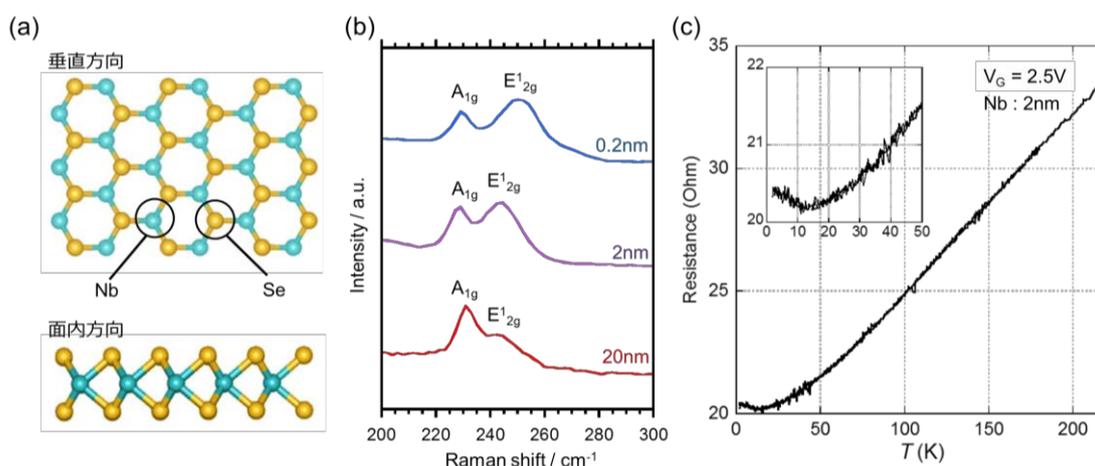


Fig. 1 (a) NbSe<sub>2</sub>のモデル図。(b) Nbのセレン化によって作製したNbSe<sub>2</sub>のラマン分光測定結果。(c) 作製したNbSe<sub>2</sub>薄膜の低温電気抵抗測定。

[1] N. E. Staley, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **80**, 184505 (2009).

[2] A. R. Kim, *et al.*, *Nano. Lett.*, **16**, 1890-1895 (2016).

[3] Y. Kim *et al.*, *Nano. Lett.* **16**, 5928-5933 (2016).

# カイラル構造を持つ $\alpha$ -IrSn<sub>4</sub> の単結晶育成と特異な輸送特性

電子物性研究室

須藤江梨

近年、トポロジカル物質として、結晶構造に反転対称性を持たない構造やカイラル構造をもつ物質の開発が精力的に進められている。しかし、カイラル構造に起因した物性特性は、充分調べられていない。我々はカイラルな結晶構造を持つ IrSn<sub>4</sub> に注目し、単結晶育成、結晶構造評価、輸送特性測定を行った。IrSn<sub>4</sub> は、同一組成を持ちながら、低温安定相( $\alpha$ )、高温安定相( $\beta$ )、高圧下安定相(HP)の三種類の構造を持つ[1]。高温安定相である  $\beta$  相は反転対称性を持ち超伝導を示すことが知られている[1]。一方、 $\alpha$  相は三方晶系(trigonal)のカイラル構造を持ち、Ir, Sn とともに同一対称サイトの最近接元素同士を結ぶと、螺旋構造が見られる (図 1 内相図)。

単結晶育成はフラックス法を用い、育成条件の最適化により、最大で約 50  $\mu\text{m}$  の単結晶の育成に成功した。 $\alpha$ -IrSn<sub>4</sub> は、互いに鏡像関係にある右巻き (空間群:#152)と左巻き (#154)の二つの構造を持ちうる。得られた複数の単結晶粒に対して X 線構造解析を行い、それぞれのドメインの比率を表す Flack parameter(= 0~1)を測定した。その結果、各単結晶粒は単相からなり、それぞれの構造を持つ単結晶粒がほぼ同程度の割合で育成されることがわかった。

これらの単結晶を用いて、電子輸送特性の測定を行った。まず、サンプルの純良性を表す残留抵抗比 RRR は約 600 にもなり、金属間化合物としては、極めて純良性の高い結晶であることが分かった(図 1)。電気抵抗は磁場中で大きな正の磁気抵抗を示し、9 T において磁気抵抗比  $\Delta\rho(H)/\rho_0$  が約 100 に達する。磁気抵抗のコーラープロットを図 2 に示すが、コーラー則がわずかに破れていることがわかった。このことは、測定した温度領域で、電子散乱が複数の散乱機構を持つことを示している。以上の成果は、 $\alpha$ -IrSn<sub>4</sub> におけるカイラル構造と電子輸送特性の関係を今後明らかにしていく上で、重要な基礎的知見を与えているものと考えられる。

参考文献： [1] V. H. tran *et al.*, J. Phys.: Condens. Matter **25** (2013) 155701.

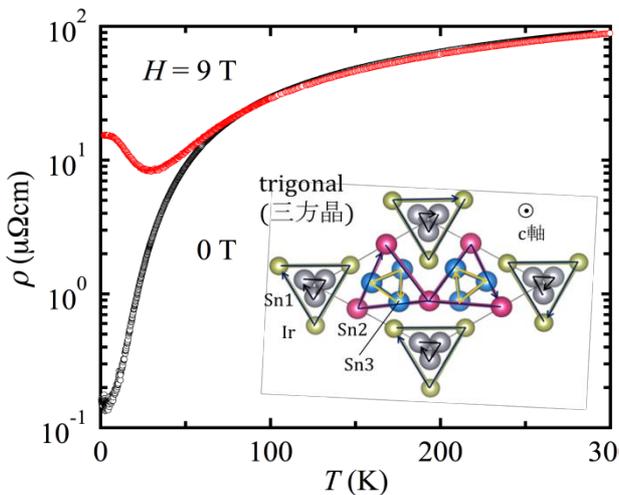


図 1  $\alpha$ -IrSn<sub>4</sub> の電気抵抗の温度依存性と結晶構造

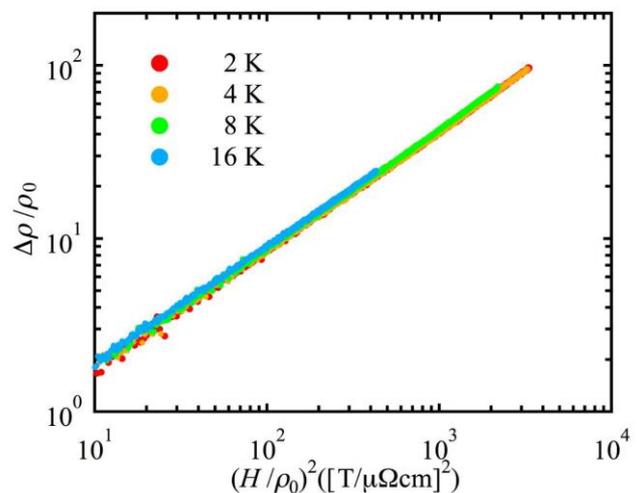


図 2 磁気抵抗のコーラープロット

# カイラルな結晶構造をもつIrGe<sub>4</sub>単結晶育成と物性測定

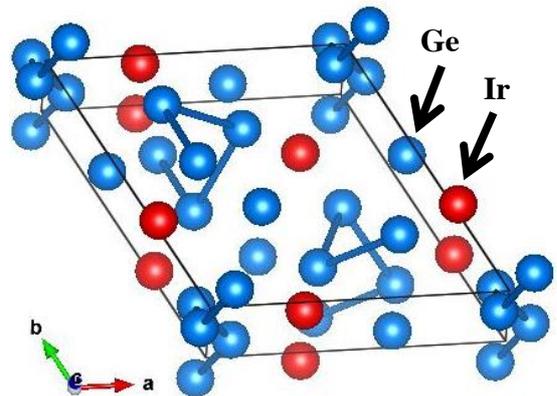
電子物性研究室

千葉優馬

近年、空間反転対称性の破れた結晶構造をもつ物質で発現する超伝導状態を始め、トポロジカル物質系における特異な物性が注目を集め、精力的に研究されている。しかし構造にカイラル対称性が加わった系に関する物質についての詳細な物性報告は少なく、そもそもどのような振る舞いが見られるのか興味深いところである。最近、カイラルな結晶構造をもつTaRh<sub>2</sub>B<sub>2</sub>における超伝導が報告された[1]。我々はこのTaRh<sub>2</sub>B<sub>2</sub>の超伝導の異方性を測定するために単結晶育成を試みたが、様々な相が混ざり合い目的物質のみを取り出すのが難しいことが判明した。そこで、この物質の構造に類似し、カイラルな結晶構造をもつ他の物質を調べた結果、IrX<sub>4</sub>(X: Sn, Ge)というTaRh<sub>2</sub>B<sub>2</sub>と似た構造の物質があることを見つけた。IrGe<sub>4</sub>は結晶構造を代表するプロトタイプのうちの一つであるにも関わらず、物性に関する報告は一切されていない[2]。そこで、IrGe<sub>4</sub>単結晶試料を育成し、電気抵抗、磁化率等の基礎物性を明らかにし、低温で超伝導状態の発現の有無を明らかにすることを目的とした。

物性測定を行うために、試料は少なくとも数mm程度の大きさが必要である。そこで、IrGe<sub>4</sub>単結晶を合成する手法としてチョクラスキー法を用いた。Arガスを満たした炉内に原料となるIrとGeを溶融させ、その融体をゆっくりと上に引き上げることで全長約11cmからなる単結晶インゴットを成長させた。粉末X線回折測定、ラウエ写真撮影、単結晶構造解析を行った結果、このインゴットがIrGe<sub>4</sub>単結晶の他にIrGe<sub>4</sub>と近い組成比からなるIr<sub>3</sub>Ge<sub>7</sub>や、Geといった複数の相からなることが判明した。

このことは、二元状態図においてIrGe<sub>4</sub>が一致溶融ではないことを示しており、それ故に大型結晶育成が困難であったことが明らかになった。幸い我々の育成したインゴット内からIrGe<sub>4</sub>単結晶を取り出すことに成功し、電気抵抗、磁化の測定を行ったので、これらの結果について報告する。



(図) IrGe<sub>4</sub>の結晶構造。ボンドでつながっているGeがc軸方向にらせん軸を描いている。

## 参考文献：

- [1] Elizabeth M. Carnicom *et al.* Sci. Adv. 4, eaar7969(2018)
- [2] P.K.Panday, K.Schubert J.Less-Common Met. 18, 191(1969)

# Nd 充填スクッテルダイトの高純度単結晶育成と電子輸送測定

電子物性研究室

平岡良太

強相関希土類金属間化合物において、発現する重い電子状態については、その発現メカニズムに加え、 $f$  電子の自由度に起因した秩序相や、超伝導状態に関して精力的に研究されてきた。歴史的には Ce 系やウラン系を中心として議論され、近年は希土類元素を含む様々な系について研究が進められている。Nd 化合物は低温で強磁性を示すものが多いが、この強磁性転移温度が絶対零度になった量子臨界点近傍の物性についての詳細な研究例は極めて少ない。またごく最近、Nd 系化合物における 2 チャンネル近藤効果が発現する可能性を議論する理論的報告<sup>[1]</sup>がなされ、その現象が起きる候補物質である  $\text{NdT}_2\text{X}_{20}$ <sup>[2]</sup> や Nd 充填型スクッテルダイト化合物等に注目が集まっている。我々は後者の Nd 充填スクッテルダイトに注目し、de Haas-van Alphen 効果測定による重い電子状態の直接観測を長期的な目標としている。Nd 系充填スクッテルダイト化合物の一部は常磁性状態において電気抵抗に近藤効果的振る舞いを示す<sup>[3]</sup>ことが知られている。その中で de Haas-van Alphen シグナルが比較的観測しやすいと考えられる物質  $\text{NdOs}_4\text{As}_{12}$  と  $\text{NdRu}_4\text{Sb}_{12}$  について高純度単結晶育成と  $\text{NdRu}_4\text{Sb}_{12}$  については低温における物性評価を行った。

$\text{NdOs}_4\text{As}_{12}$  は高圧下 As-フラックス法、 $\text{NdRu}_4\text{Sb}_{12}$  は Sb-フラックス法により図 1、図 2 のような試料を育成した。結晶の評価は単結晶構造解析を行い、それぞれ単相であることを確認した。 $\text{NdRu}_4\text{Sb}_{12}$  においては低温の電気抵抗測定から残留抵抗比  $RRR=27$  とわかり、一般的に dHvA シグナルが観測できると言われる目安  $RRR=20$  を充分超える高純度な単結晶の育成に成功した。この試料を用いた電気抵抗の測定結果を図 3 に示す。ゼロ磁場において、低温 10 K 以下で近藤効果に起因すると考えられる抵抗上昇が確認できた。また 1.5 T の磁場印加により、この抵抗上昇が抑制される負の磁気抵抗が観測されることが分かった。

## 参考文献：

- [1] T.Hotta, J. Phys. Soc.Jpn. 86, 083704 (2017)
- [2] T. Namiki *et al*, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 073706 (2016)
- [3] P.-C. Ho *et al*, Phys. Rev. B 72, 094410 (2005)

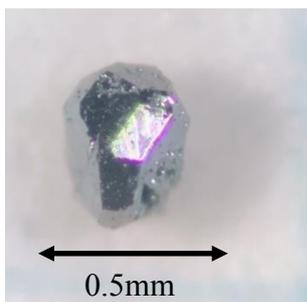


図 1:  $\text{NdOs}_4\text{As}_{12}$  の結晶

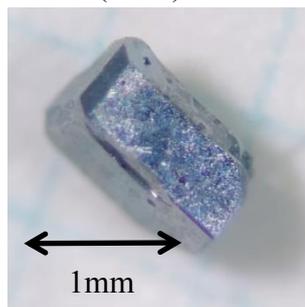


図 2:  $\text{NdRu}_4\text{Sb}_{12}$  の結晶

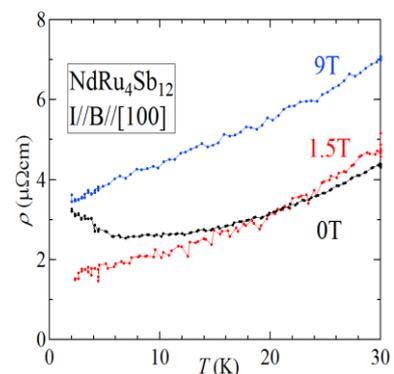


図 3:  $\text{NdRu}_4\text{Sb}_{12}$  の電気抵抗測定

## 準二次元的な希土類層を持つ

### Sm<sub>2</sub>Pt<sub>6</sub>Ga<sub>15</sub> 単結晶育成とその物性測定

電子物性研究室

坪田 棕

希土類化合物における強相関電子物性は、これまで主として 4f 電子もしくは 4f 正孔を一つ持つ Ce や Yb 化合物において研究が行われてきたが、最近 4f 電子を複数持つ Sm 化合物において磁場に鈍感な相転移・重い電子状態といったこれまでの枠組みでは説明できない奇妙な強相関電子状態が発見されており、注目を集めている。我々は、Sm 系特有の新規強相関電子物性を探索するために Sm 三元化合物の物質探索を進め、準二次元的な希土類層を持つ Sm<sub>2</sub>Pt<sub>6</sub>Ga<sub>15</sub> に注目した。Sm<sub>2</sub>Pt<sub>6</sub>Ga<sub>15</sub> は図 1 に示すように c 面内に Sm が三角格子を組む構造をとるが、その面内の Sm, Ga の占有率が約 2/3, 1/3 と欠損があることが報告されており[1]、その詳細な結晶構造は確定されていない。また、物性報告としては 7K 付近で磁気転移を示すことが報告されているのみである[2]。

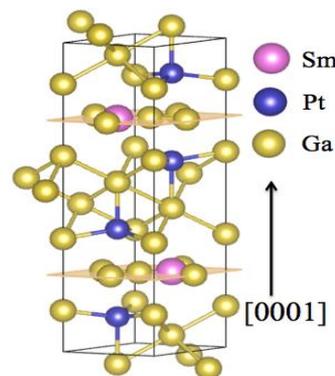


図 1 : Sm<sub>2</sub>Pt<sub>6</sub>Ga<sub>15</sub> 結晶構造

そこで、我々はまず Ga 自己フラックス法により Sm<sub>2</sub>Pt<sub>6</sub>Ga<sub>15</sub> の単結晶育成を行い、その結晶構造決定を試みた。磁化率の温

度依存性は高温側では常磁性的振る舞いを示し、 $T = 7\text{K} (= T_M)$  以下で磁化率が c 軸方向に増大し、c 軸に垂直な面内で減少する異方性を示す。このことは、磁気モーメントが c 面内に反強磁性的な相関を持ち、c 軸方向に少し傾いた磁気構造を持つ可能性を示唆している。電気抵抗の温度依存性では、 $T = T_M$  付近で抵抗率が增大する振る舞いを観測した。これは、磁気転移に伴うギャップ形成により、キャリア数が減少していることを示している。

#### 参考文献：

- [1] G. H. Kwei *et al.*: Acta Cryst. **B52** (1996) 580-585
- [2] Y. Matsumoto *et al.*: J. Phys. **683** (2016) 012035

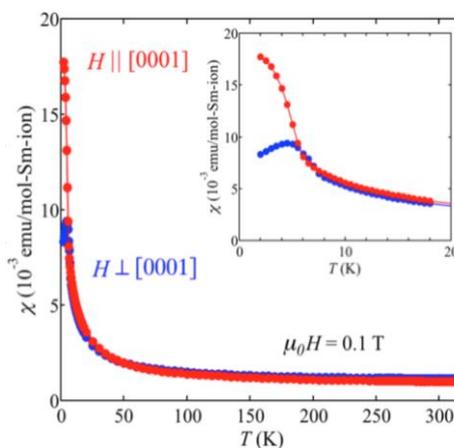


図 2 : 帯磁率の異方性

# 層状化合物 $\text{Eu}_3\text{Bi}_2\text{S}_4\text{F}_4$ の特異な局在現象と巨大な負の磁気抵抗

電子物性研究室

酒谷瞭太郎

$\text{LnO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$  ( $\text{Ln}$ =ランタノイド)を代表とする  $\text{BiS}_2$ 系層状化合物において、 $\text{O}^{2-}$ を  $\text{F}^-$ に置換することによる  $\text{BiS}_2$ 伝導層へのキャリアドーピングで超伝導が発現することが報告されている。近年、 $\text{Eu}_3\text{Bi}_2\text{S}_4\text{F}_4$ [1]では、 $\text{Eu}$ が中間価数状態をとることによって  $\text{BiS}_2$ 伝導層に電子がセルフドーピングされ、ブロック層に元素置換をすることなく超伝導が発現することが多結晶試料を用いた研究から報告された。我々は、 $\text{Eu}_3\text{Bi}_2\text{S}_4\text{F}_4$ の単結晶試料育成に成功し、磁化と比熱の測定から、 $\text{Eu}$ が中間価数状態であること、2.2 K以下で  $\text{Eu}$ 磁気モーメントが  $c$ 軸方向を向いた反強磁性状態が発現することなどを明らかにした[2]。この単結晶試料を用いて電子輸送特性を調べた。

電気抵抗率の温度依存性を図1に示す。30 K以下の低温領域で  $T^{-3}$ に依存し、室温から0.6 Kにかけて7桁増大する特異な電子輸送特性を示す。超伝導転移は見られない。この温度依存性は、弱局在効果では説明できず、何らかの特異な局在効果によるものと考えられる。また、電気抵抗は磁場中で巨大な負の磁気抵抗を示し、2 Kで約1/100となる。磁化カーブと比較したところ、図2に示すように、磁気抵抗と磁化カーブがスケーリング則を用いて整理できることがわかった。この振る舞いは、 $\text{BiS}_2$ 層内のキャリアがブロック層内の  $\text{Eu}$ 磁性イオンと強く結合していることを示しており、本研究で見出した特異な局在現象のメカニズムに深く関与しているものと考えられる。

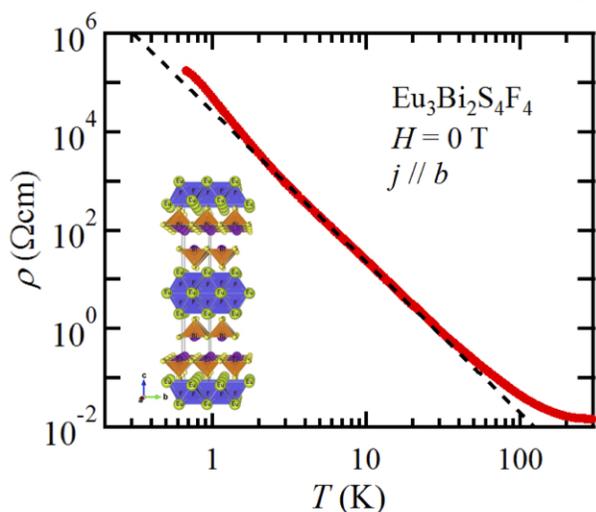


図1. 電気抵抗率の温度依存性

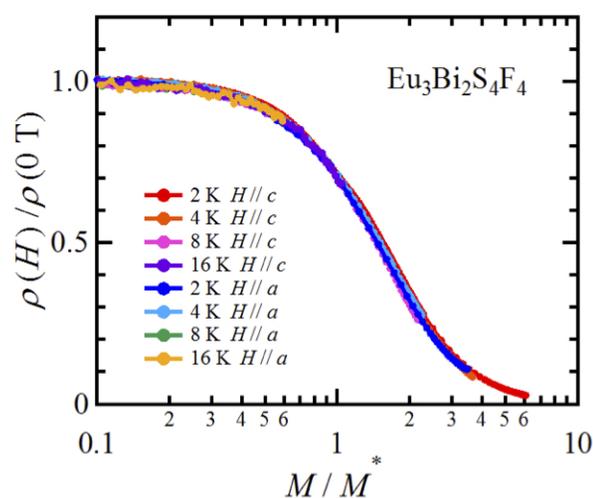


図2. 磁気抵抗と磁化が満たすスケーリング則

参考文献：

[1] Hui-Fei Zhai *et al.* J. Am. Chem. Soc. **136**, 15386 (2014).

[2] R. Higashinaka *et al.* Physica B **536**, 824 (2018).

# InTe 高压相の超伝導特性に対する元素置換

超伝導物質研究室

勝野正誉

InTe は In 価数が +1 価と +3 価の混合状態であり、バレンススキップ物質として興味深い。常圧下で合成した InTe は TlSe 型構造をとるが、高压合成を用いることで NaCl 型構造の InTe が得られ、 $T_c \sim 3$  K の超伝導を示す[1]。

本研究では、NaCl 型（高压相）の InTe に対して元素置換をすることで転移温度上昇および新超伝導体の発見を目指した。Te サイトを S や Se で置換した  $\text{InTe}_{1-x}\text{S}_x$ 、 $\text{InTe}_{1-x}\text{Se}_x$  および In サイトを Pb で置換した  $\text{In}_{1-x}\text{Pb}_x\text{Te}$  を合成した。本講演では Pb 置換の結果を詳細に報告する。

$\text{In}_{1-x}\text{Pb}_x\text{Te}$  ( $x = 0-1$ ) の多結晶試料は真空石英管中での熔融（800 °C で 10 時間反応）によって合成した。得られた試料を粉砕し、ペレット化したのち、3 GPa, 500 °C, 30 分の条件で高压下アニールを行った。粉末 X 線回折とリートベルト解析により相同定と格子定数の評価を行い、EDX による組成分析を行った。磁化率の温度依存性から超伝導特性の評価を行った。

粉末 XRD の結果から、すべての組成で NaCl 型構造をとることがわかった。磁化率測定において  $x = 0-0.6$  においてバルクな超伝導を観測した。 $\text{In}_{1-x}\text{Pb}_x\text{Te}$  は本研究で見出した新しい超伝導相である。Pb 置換により、転移温度は図 1 に示す通り上昇した。バレンススキップ状態と超伝導の相関について議論する。

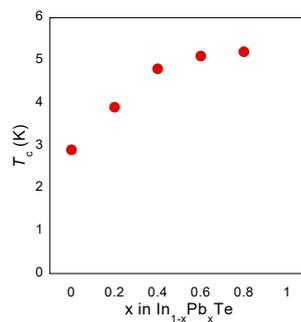


図 1.  $\text{In}_{1-x}\text{Pb}_x\text{Te}$  の  $T_c$  の Pb 置換量( $x$ )依存性

## 参考文献：

- [1] K. Kobayashi, Phys. Rev. B **97**, 104511 (2018)

# SnAs 系層状超伝導体の元素置換効果

超伝導物質研究室  
宇文浩

2017年に新しい層状超伝導体  $\text{NaSn}_2\text{As}_2$  が発見された[1]。  $\text{NaSn}_2\text{As}_2$  は Na ブロック層と SnAs 伝導層の交互積層構造を持ち、銅酸化物系や鉄系の高温超伝導体と類似の層状構造を持つため、高温超伝導や非従来型メカニズムの超伝導が発現する可能性がある。これまでに報告された  $\text{NaSn}_2\text{As}_2$  の転移温度 ( $T_c$ ) は 1.2~1.6 K であり[1,2]、さらなる  $T_c$  上昇が望まれる。本研究では、 $\text{NaSn}_2\text{As}_2$  の元素置換効果を研究し、 $T_c$  上昇を目指した。Na サイト、Sn サイト、As サイトへの様々な元素置換効果を検証した結果、Sn サイトに Na を部分置換することで、 $T_c$  が 2.1 K まで上昇することを見出した。

試料合成はグローブボックス (Ar 雰囲気) 中で行った。出発原料として  $\text{Na}_3\text{As}$  を合成し、 $\text{Na}_3\text{As}$ 、Sn、As を混合し、ペレット化した後真空封入し、電気炉で焼成した。最適な焼成条件は、500 °C で 24 時間であった。得られた試料は粉末 X 線回折により相同定を行い、SEM-EDX により組成分析を行った。超伝導特性は SQUID 磁束計を用いた磁化測定と四端子法による電気抵抗測定により評価した。電気抵抗率の温度依存性を図 1 に示す。 $\text{NaSn}_2\text{As}_2$  の Sn サイトを Na で 20% 置換した試料 ( $x = 0.4$ ) において、 $T_c = 2.1$  K の超伝導転移を観測した。今後、Na 置換による  $T_c$  上昇機構を解明することで、超伝導機構が解明され、さらなる物質設計指針が見出されることが期待される。

[1] Y. Goto et al., J. Phys. Soc. Jpn. 86, 123701 (2017).

[2] E. J. Cheng et al., EPL 123, 47004 (2018).

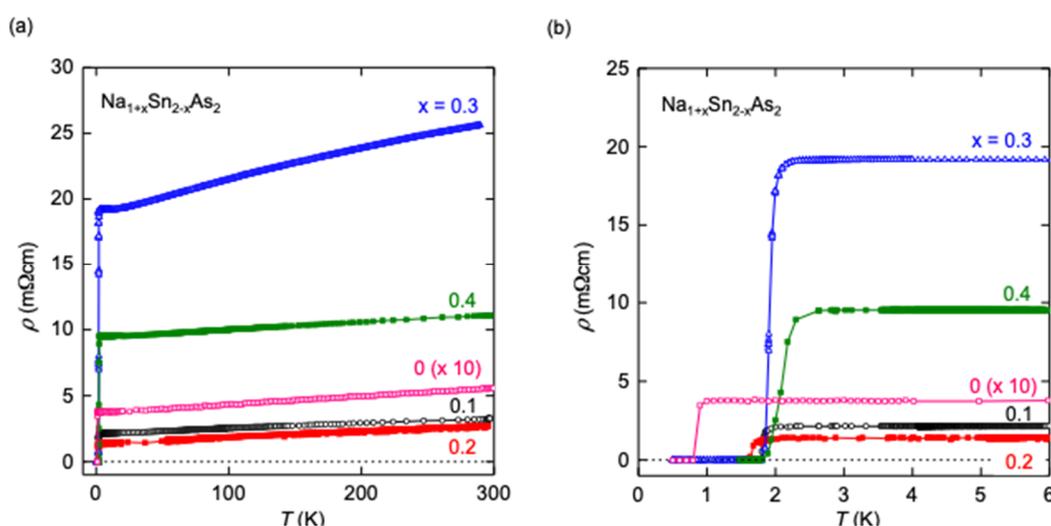


図 1.  $\text{Na}_{1+x}\text{Sn}_{2-x}\text{As}_2$  の電気抵抗率の温度依存性。(a) 室温以下の全温度領域。(b) 超伝導転移近傍。

## RE123系高温超伝導体の高エントロピー化による特性向上に向けた研究

超伝導物質研究室

宿南勇太

1987年に発見されたRE123系超伝導体（REは希土類であり、典型物質は $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$ である）は銅酸化物高温超伝導体の一つで、液体窒素温度（77 K）を超える転移温度（ $T_c$ ）をもつ [1]。銅酸化物高温超伝導体特有の銅と酸素が作る $\text{CuO}_2$ 面が伝導層として存在し、伝導層とブロック層が積層した層状構造を持っている。現在、RE123系超伝導体を実用化するための材料研究が進められている。もし、既存物質の $T_c$ や臨界電流密度（ $J_c$ ）を大幅に超えるRE123系超伝導体を合成できれば、実用化の大きな一歩となる。

上記の目標を実現するために、本研究では層状物質の高エントロピー合金効果に着目する。高エントロピー合金とは、一つの元素サイトに5種類以上の元素を5-35%の占有率で固溶させた合金と定義され、従来材料と比較して強度や耐久性が増強することから構造材料や生体材料の分野において研究されている。最近、我々は高エントロピー合金サイトを持つ層状超伝導体の合成を報告した[2]。 $\text{BiS}_2$ 系層状超伝導体 $\text{REO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ において、REサイトを高エントロピー合金化することで、伝導層の局所構造が変化し、バルクな超伝導が発現することを示した[3]。このコンセプトをRE123系超伝導体のREサイトに適応する（図1）。本研究では、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$ を出発組成とし、Yサイトを1~4種類のREで置換した多結晶試料を固相反応法により合成した。粉末X線回折から相の同定および格子定数の決定を行い、磁化率の温度依存性から超伝導特性を評価した。研究成果として、高エントロピー合金型のブロック層を持つRE123超伝導体（ $\text{Y}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Pr}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Sm}_{0.2}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$ ）の合成に成功し、バルク超伝導（ $T_c \sim 45$  K）の観測に成功した。また、RE数を変えた様々な超伝導体を合成した結果、 $T_c$ が90 Kとなる組成（REの組み合わせ）や、 $T_c$ が減少し超伝導が消失する組成があることを解明した。

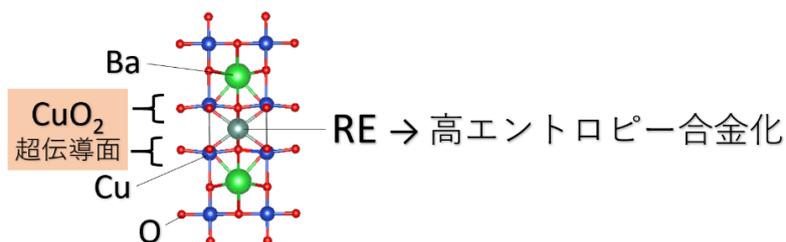


図1. RE123系超伝導体の結晶構造図とREサイトの高エントロピー合金化概念図.

### 参考文献

[1] M.K.Wu et al., Phys. Rev. Lett. 58, 908 (1987).

[2] R. Sogabe, Y. Goto, Y. Mizuguchi, Appl. Phys. Express 11, 053102 (2018).

[3] R. Sogabe et al., arXiv: 1808.04090.

# Ag(Bi,Sb)Se<sub>2</sub> 固溶体の結晶構造と熱電特性

超伝導物質研究室

須藤健太

現在、一次エネルギーの6割は熱として排出されており、廃熱の再利用は人類にとって重要な課題である。この課題を解決する方法の一つとして、熱電変換技術がある。熱電変換とは熱エネルギーと電気エネルギーを直接変換する技術であり、この技術を用いて廃熱の再利用を実現するため新しい熱電材料の研究が進められている。

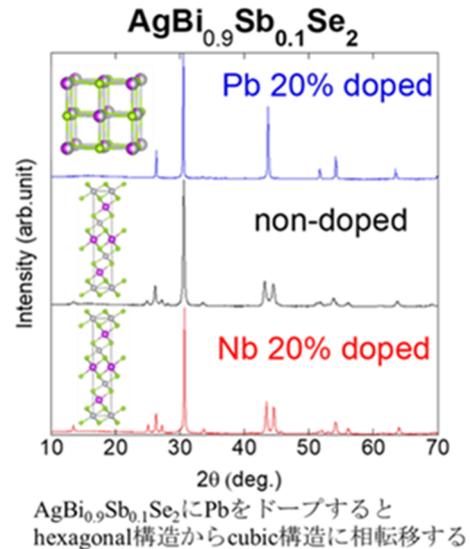
本研究では、Ag(Bi,Sb)Se<sub>2</sub> 固溶体の結晶構造と熱電特性について研究した。

AgBiSe<sub>2</sub> と AgSbSe<sub>2</sub> はそれぞれ n 型、p 型の熱電変換物質として報告されており、n 型のドーパントとして Nb、p 型のドーパントとして Pb をドーピングすることで熱電性能が最適化される[1-3]。室温において、AgBiSe<sub>2</sub> は hexagonal 構造をとるが、AgSbSe<sub>2</sub> は cubic 構造をとる。本研究では、Ag(Bi,Sb)Se<sub>2</sub> 固溶体において hexagonal 構造と cubic 構造の相境界と考えられる AgBi<sub>0.9</sub>Sb<sub>0.1</sub>Se<sub>2</sub>

(hexagonal 構造) と AgBi<sub>0.7</sub>Sb<sub>0.3</sub>Se<sub>2</sub> (cubic 構造) を新規に合成した。それぞれの固溶体に対して Pb または Nb をドーピングし、結晶構造と熱電特性の変化を評価した。AgBi<sub>0.9</sub>Sb<sub>0.1</sub>Se<sub>2</sub> に Pb をドーピングすると hexagonal 構造から cubic 構造に相転移することがわかった。一方、AgBi<sub>0.7</sub>Sb<sub>0.3</sub>Se<sub>2</sub> に Nb をドーピングすると cubic 構造から hexagonal 構造に相転移することがわかった。この結果から、ドーパントによっても構造相転移が起こることが示された。本発表では、結晶構造と熱電物性のドーパント（元素および濃度）依存性について詳細に報告する。

## 参考文献：

- [1] L. Pan, D. Berardan and N. Dragoe, *J. Am. Chem. Soc.*, 2013, **135**, 4914–4917
- [2] S. N. Guin, A. Chatterjee, D. S. Negi, R. Datta and K. Biswas, *Energy Environ. Sci.*, 2013, **6**, 2603–2608
- [3] Y. Goto, A. Nishida, H. Nishiate, M. Murata, C. H. Lee, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa and Y. Mizuguchi, *Dalton Trans* 2018, **47**, 2575-2580



# 層状超伝導体のギャップ関数とフェルミ面構造の関係

強相関電子論研究室  
15163073 堀川 亮

1986年に発見された銅酸化物高温超伝導体は、銅と酸素から成る2次元の電気伝導面が、絶縁体であるブロック層によって挟まれている特徴的な層状構造を持つ。この層状構造に高温超伝導発現のカギの一つがあると考えられ、層状超伝導体の研究が盛んになり、我が国で鉄系超伝導体が発見されるに至った[2]。さらに、2012年に首都大学東京の水口らが発見した  $\text{BiS}_2$ 系超伝導体も、 $\text{BiS}_2$ 伝導面がブロック層で挟まれた構造をもっている[3]。

本研究では、層状超伝導体において超伝導転移温度  $T_c$  が上昇する機構を理解する第一歩として、フェルミ面構造とギャップ関数  $\Delta_k$  の関係を BCS 理論の枠内で調べた。 $T_c$  におけるギャップ方程式は次で与えられる。

$$\Delta_k = - \sum_{k'} V(k, k') \frac{\Delta_{k'}}{2\varepsilon_{k'}} \tanh \frac{\varepsilon_{k'}}{2T_c}$$

ここで、 $\mathbf{k}$  は波数ベクトル、 $\varepsilon_k$  は電子のバンド分散、 $V(k, k')$  は対相互作用である。本研究では2次元正方格子を考え、同一サイト上の相互作用  $V_0$  と隣接サイトの電荷間の相互作用  $V_1$  を用いて、 $V(k, k') = V_0 + V_1[\cos(k_x - k_{x'}) + \cos(k_y - k_{y'})]$  と仮定する。

対相互作用の  $V_0$  と  $V_1$  を変えて、べき乗法によってギャップ方程式を解き、s波とd波のそれぞれについて、 $T_c$  と  $\Delta_k$  を求めた。べき乗法を実行する際、ギャップ方程式が畳み込みの形になっていることを利用して、高速フーリエ変換(FFT)を用いて計算を高速化するプログラムを開発した。FFTを用いない計算も行っており、プログラムをチェックした。

$\text{BiS}_2$ 系超伝導体を念頭においたバンドと、比較のため、最近接サイト間の跳び移りを  $t$  としたときのバンド  $\varepsilon_k = -2t(\cos k_x + \cos k_y) - \mu$  ( $\mu$  は化学ポテンシャル) について、ギャップ方程式を解いて得られた超伝導状態相図とそれぞれのフェルミ面を下に示す。それぞれのフェルミ面構造に注目し、ギャップ関数に与える影響について議論する。

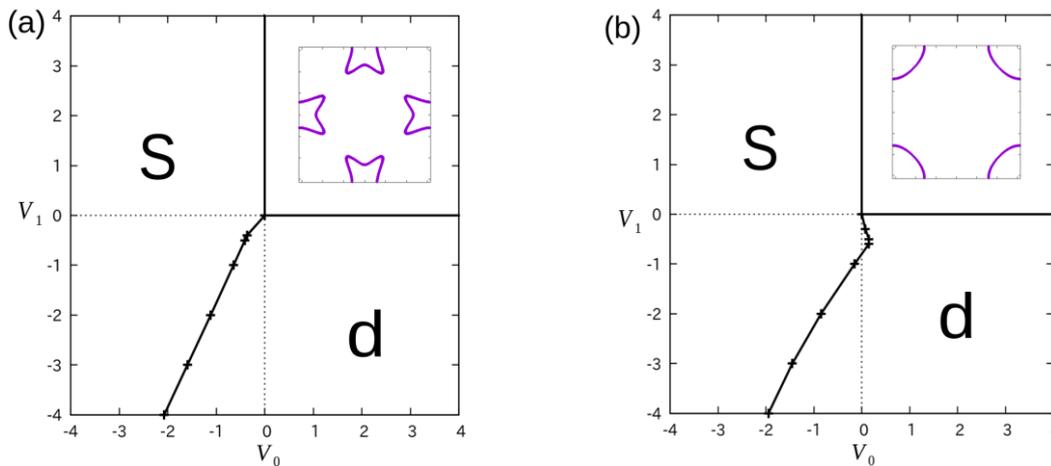


図1:(a) $\text{BiS}_2$ 系超伝導体のバンドを用いて計算した超伝導状態相図とフェルミ面。(b)2次元正方格子上の強束縛バンド  $\varepsilon_k = -2t(\cos k_x + \cos k_y) - \mu$  の場合の超伝導状態相図とフェルミ面。ここでは  $\mu = 2t$  としている。なお、(a)と(b)、いずれの場合も、 $V_0 > 0, V_1 > 0$  の領域では超伝導にならない。また、エネルギー単位はバンド幅である。

## 参考文献

- [1] J. G. Bednorz and K. A. Müller, Z. Phys. B **64**, 189 (1986).
- [2] Y. Kamihara et al., J. Am. Chem. Soc. **130**, 3296 (2008).
- [3] Y. Mizuguchi et al., J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 114725 (2012).

# 三角格子 Potts 模型の実空間くりこみ群解析

強相関電子論研究室

杳澤直輝

くりこみ群はもともと場の量子論から発展した概念であるが、2次相転移の臨界現象を主な舞台に Wilson, Fisher, Kadanoff らにより統計力学におけるくりこみ群が確立された。くりこみ群では自由度の粗視化とスケール変換を用いて、系の変数を各スケールで追跡することができる。ここで重要なことは、変換の前後で変数が変化しないときであり、その変数空間上の点は固定点と呼ばれる。特に相転移の臨界温度と関係する固定点は臨界固定点と呼ばれる [1]。

本研究では三角格子上の3状態 Potts 模型 [2] を例に、実空間くりこみ群の有用性を考察する。実空間くりこみ群はスピン系において有用な方法であり、数値計算との相性もよいのでよく用いられる。Potts 模型は2自由度の Ising 模型を多自由度に拡張したものであり、本研究では3つの状態を  $p = r, g, b$  とおく。ハミルトニアンは

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} \delta_{p_i p_j} - h \sum_i \delta_{p_i r}$$

と表され、 $J$  は相互作用、 $h$  は外場 (磁場) である。

本研究では、実空間くりこみ群を用いて、図1のように正三角形の頂点上の3サイトの状態と、図2のように正六角形内の7サイトの状態を粗視化した場合について、変数  $J, h$  の変化を解析する。実際には  $J, h$  以外の様々な項が生じるため、厳密にくりこみ群を実行するのは難しい。ここでは摂動展開の方法 [1] を用いて切断近似を行う。解析の結果、3サイトにおけるくりこみ群変換での転移点と臨界指数  $\nu$  は  $T_c = 1.10J, \nu = 0.908$ 、7サイトにおいては  $T_c = 1.31J, \nu = 0.931$  となる。ここで、 $\nu$  は相関長  $\xi \sim (T - T_c)^{-\nu}$  で定義される。これらは平均場近似による値  $T_c = 6J, \nu = 0.5$  に比べて厳密解の結果 [2]  $T_c = 1.58J, \nu = 0.833$  に近いものになっており、揺らぎの結果が考慮されていることがわかる。

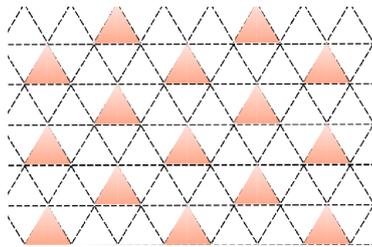


図1 3サイトのブロックスピン変換

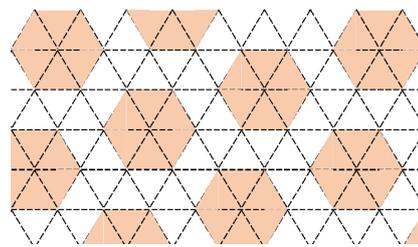


図2 7サイトのブロックスピン変換

## 参考文献

- [1] 高橋和孝, 西森秀稔, 相転移・臨界現象とくりこみ群 (丸善出版) 2017.
- [2] F. Wu, Rev. Mod. Phys. **54**, 235 (1982).

# くりこみ群を用いた $\varphi^4$ 模型の解析

強相関電子研究室  
青木太一

ウィルソンは素粒子理論におけるくりこみ群の考え方を、統計物理学でカダノフらが発展させてきたスケーリング理論の考え方と融合させて、物性物理学のくりこみ群の枠組みを完成させた。くりこみ群の考え方は、場の量子論や多体問題など様々な問題に適用されている普遍的な考え方の1つと言える。

本研究では運動量空間くりこみ群を用いて、以下の  $\varphi^4$  模型を解析する。

$$\mathcal{H} = \int d^d \vec{r} \left( +\frac{1}{2}(\nabla \vec{\varphi}(\vec{r}))^2 + \frac{t}{2}(\vec{\varphi}(\vec{r}))^2 + \frac{u}{4!}(\vec{\varphi}(\vec{r}))^4 - H(\vec{\varphi}(\vec{r})) \right) \quad (1)$$

$\vec{\varphi}$  は  $\vec{\varphi}(\vec{r}) = (\varphi_x(\vec{r}), \varphi_y(\vec{r}))$  の2次元ベクトル場である。 $t, u, H$  は結合定数であり、スピン変数に対応する場  $\vec{\varphi}$  は連続空間上の点で定義される。くりこみ群とは、系のスケールを変換する事で臨界現象を記述する手法である。スケール変換と共に結合定数は変化し、図1に示した様なくりこみ群の流れとして表される。臨界現象の普遍性はスケール変換に対して不変な点：固定点の周りのくりこみ群の流れと関係している [1]。本研究で用いた模型 (1) では、 $\varepsilon = 4 - d$  ( $d$  は空間次元、ここでは  $d = 3$  とし3次元系とする。) と置いて  $\varepsilon$  を微小量と見なし  $\varepsilon$  について展開を行い、最後に  $\varepsilon = 1$  と外挿して3次元の結果を導いた。この様な手法を  $\varepsilon$  展開という。そして結果として固定点 (Wilson-Fisher 固定点) が現れ、3次元 XY 模型の臨界指数の値 ( $\nu \sim 0.60$ ) を得ることができた。この値はモンテカルロ法から得られた値 ( $\nu \sim 0.66$ ) [2] と比較しても、精度の良い近似である事が理解できる。

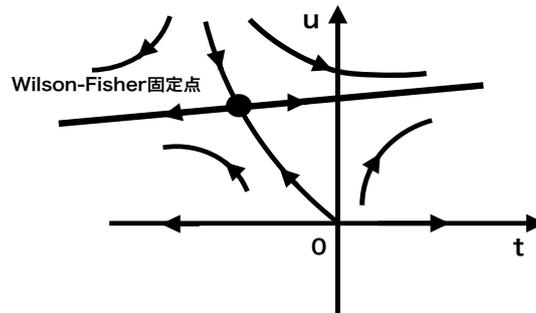


図1 Wilson-Fisher 固定点付近の振る舞いの図

## 参考文献

- [1] 相転移・臨界現象とくりこみ群 丸善出版 高橋和孝, 西森秀稔 (2017).
- [2] A. P. Gottlob and M. Hasenbusch, Physica A, **30**, 593 (1993).

# 温度勾配下にある二分子膜中の Latex 粒子の運動

ソフトマター研究室

寺田行宏

【背景と目的】界面活性剤と水の混合系に存在する両親媒性分子は、疎水基同士が結合することで様々な自己会合体を形成し、高次構造を形成する。高次構造の一つである二分子膜は、さらに膜が層状に並ぶラメラ相や、膜が連結するスポンジ相と呼ばれる高次な構造を形成する [1]。この二分子膜は生体膜のモデル系として研究が盛んにおこなわれている。膜の揺らぎは高温で大きくなり、低温で小さくなるという一般的にも理解しやすい性質があったが、二分子膜を温度勾配下に置いたとき二分子膜は高温で揺らぎが小さくなり、低温で大きくなるという逆の性質を示す結果が得られている [2]。生体膜では、その内部に他の成分が存在している。そこで、二分子膜に Latex 粒子を混合し、温度勾配下における Latex 粒子の運動について調べることを目的とした。

【方法】試料には非イオン性界面活性剤である  $C_{10}E_3/H_2O$  を用いて、純粋で濃度調整を行った。ホメオトロピックに配向させたのち、温度勾配がかかるように2枚の別々に温度コントロールされたガラスヒーターの上に載せた。ローダミン 6G を付加してその蛍光強度の時間変化の測定、微分干渉顕微鏡を用いた Latex の目視による観察を行った。

【結果と考察】蛍光強度を測定した結果、低温領域では時間によってほとんど変化がなかったのに対し、温度勾配領域、高温領域では時間によって減少した。特に、高温領域では、他2つの領域に比べて減少度が著しかった。これは先行研究と同様に高温側の揺らぎが小さくなっていることを意味している。また、Latex 粒子を入れて測定した結果、本来なら低温側へ行くはず [3] の Latex 粒子が高温側へ移動した。以上のことから、二分子膜に温度勾配をかけた時、低温領域の大きくなった膜の揺らぎによって、Latex 粒子が押し出されて高温領域へ向かうことがわかった。

## 参考文献：

- [1] 瀬戸秀紀, 「ソフトマター」米田出版 [2] R. Kurita, S. Mitsui and H. Tanaka, Phys. Rev. Lett. 119, 108003 (2017) [3] H. Tanaka, M. Isobe, and J. Yamamoto: Phys. Rev. Lett., 89, 168303 (2002)

## くさび形セル中のゼラチン対流の速度場解析

ソフトマター研究室

篠原 良子

味噌汁や雲など身の回りには多くの熱対流現象が存在する。熱対流は、熱伝導では温度差を解消しきれずに流体ごと運動するようになった結果起こるものである。レイリー・ベナール型の対流では、対流の発生はレイリー数と呼ばれる無次元数によって主に支配されている。流体の上面を低温、下面を高温にしたとき、あるレイリー数を超えると浮力が粘性に打ち勝って対流が起こる。

対流の系統的な研究は 1900 年頃から始まり、今日までに多くのことが説明されている。しかし、粘性が温度に強く依存するような流体の対流など、まだまだ未解明なことも多い。それらを明らかにすることは、身の回りの現象についての理解が深まるだけでなく、工学的にも重要な役割を果たすと考えられる。

物理ゲルであるゼラチンの上面を不均一に冷却（図 1 の上面左半分を冷却）させながら下面を加熱すると、冷却部分はゲル化して対流しないため、従来は難しかった上面温度一定のくさび形セル中での対流を観察できる。この系において、渦が上面冷却側から非冷却側（図 1 の左から右）に移動していく様子が観察されている。また、下降流を隔てた渦の流れに速度差があることがわかっている [1]。

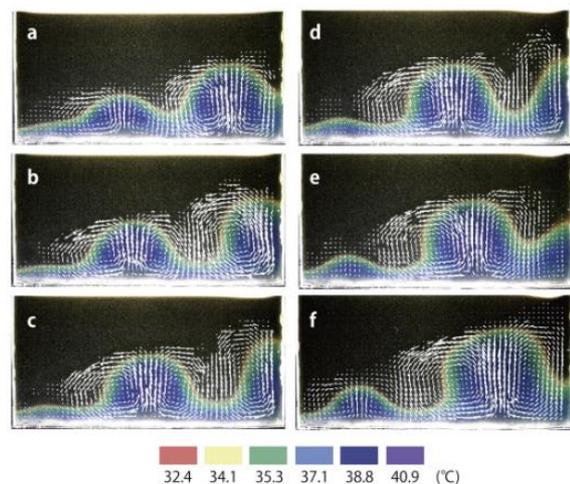


図 1. 渦移動の時間発展

しかしながら、渦が移動していくメカニズムは明らかになっていない。自然界の渦は同じ大きさとは限らない。このメカニズムを明らかにすれば、より自然界に近い対流現象（例えば、マントル対流）の理解につながる可能性がある。

そこで今回の実験では、対流の撮影の空間解像度をあげて、速度場をより詳細に求めた。速度場の解析には PIV 法（粒子画像流速測定法）を用いた。この結果について発表を行う。

[1] Kobayashi, K. U., Oikawa, N. & Kurita, R. J. Phys. Soc. Jpn. 86, 043402 (2017)

# 深度の異なる二領域をもつ系における歩行液滴の挙動

ソフトマター研究室

森 智哉

液面上に同一成分の液滴を垂らすと、液滴は液面と直ちに結合する。しかしながら液面が鉛直方向に加振されているときに液滴を垂らすと、液滴が結合せずに液面上を跳ね続け、液面と平行な方向に対して自己推進運動することがある[1]。この自己推進する液滴は歩行液滴と呼ばれる。この歩行液滴は、局所的に生じるファラデー不安定性によって引き起こされる。ファラデー不安定性とは鉛直方向に振動を加えたとき水面が不安定になり、波が生じる状態を指す。ファラデー不安定が生じるためには、加振振幅が一定の値を超える必要がある。この値はファラデー閾値と呼ばれている。液滴が加振された液面上を跳ねると、液滴近傍でファラデー不安定性により水面波が生じる。液滴は水面波で傾いた液面上を落下するため、特定の一方向に向かって跳ね進む。ファラデー閾値は系の水深に依存していて浅いほど大きくなる[2]。歩行液滴の運動は、ファラデー閾値と加振振幅の差の大きさによって異なった振る舞いを示すことが知られている[3]。

これまでの研究では一様深さの系、つまりファラデー閾値がどの領域でも一定な系を中心に研究が行われてきた。一方で、ファラデー閾値が領域によって異なる系は注目されていなかった。我々は、浅い部分と深い部分の二つの領域を持つ系において歩行液滴の加速度依存性を実験的に調べた。加速度によって歩行液滴の運動が変化することがわかった。今回はその実験結果について、発表する。

## 参考文献：

- [1] Couder, Yves, et al. "Dynamical phenomena: Walking and orbiting droplets." *Nature* 437.7056 (2005): 208.
- [2] Kumar, Krishna. "Linear theory of Faraday instability in viscous liquids." *Proc. R. Soc. Lond. A* 452.1948 (1996): 1113-1126.
- [3] Pucci, Giuseppe, et al. "Walking droplets interacting with single and double slits." *Journal of Fluid Mechanics* 835 (2018): 1136-1156.

# 直径の異なる高純度単一カイラリティナノチューブの精製

表界面光物性研究室

生駒 葉奈

近年、IoT 社会が発展していくなか、無数のセンサーを駆動する電源として熱電変換素子が注目されている。1次元材料系は大きな熱電変換性能を示すことが予想されており、当研究室では、1次元材料のモデルである単層カーボンナノチューブ(SWCNT)の熱電変換物性に注目している。SWCNTは巻き方(カイラリティ)や直径により、金属型・半導体型の違いや、バンドギャップの違いが生まれる。先行研究では、半導体型SWCNTに1%でも金属型が混ざると大幅に熱電効率が下がることが示されている[1]。したがって、高純度な試料を得ることは、SWCNTの構造と熱電特性を対応づけて議論する上で必要不可欠である。そこで当研究では、直径の異なる高純度のSWCNTを得ることを目指し、複数の界面活性剤を用いたゲル分離を行うことで、(9,4)、(10,3)の2つの直径の異なるカイラリティのナノチューブを高純度に分離することに成功した。方法は以下の通りである。第一段階として、高速液体クロマトグラフィーを用いて、界面活性剤の直径選択性を利用したゲル分離を行った。第二段階として、CO<sub>2</sub>を用いた精密なpH調整を行うことで、分離することが困難であった金属型の除去に成功した。(9,4)は純度92%、(10,3)は純度98.4%に分離ができた(図1, 図2参照)。(10,3)は現在世界最高純度となっている[2]。今後、更なる高純度化を行うとともに、これを用いた熱電デバイスの性能評価を行っていく。

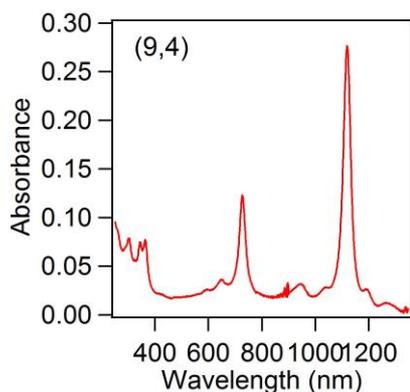


図1 (9,4)のスペクトル

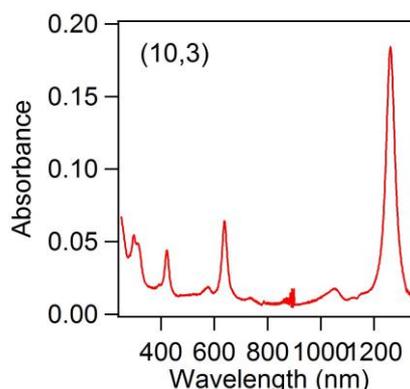


図2 (10,3)のスペクトル

参考文献: [1] D. Hayashi et al, Appl. Phys. Express 9 (12), 125103 (2016)

[2] Y. Yomogida et al, Nat. Commun., 7 (2016) 12056

# 単層カーボンナノチューブの配列制御の研究

表界面光物性研究室

堀内加奈子

近年、湾曲可能なスマートフォンディスプレイのように、柔らかい界面を持つ物質系は広く使われている中、そのような柔らかい物質系における熱・電荷輸送を固体電子論を用いて理解し、そしてデバイス特性を制御する指針を得ることは重要な課題の一つである。単層カーボンナノチューブ(SWCNT)に代表されるナノ物質や高分子ポリマー・分子系など、分子間力で接合した柔らかい系では、その電子構造や接合構造、フェルミレベルが大きくその物性に影響を及ぼす。剛直で単純な構造を持ち、系統的に電子構造・フェルミレベルを改変可能なSWCNTは、柔らかい系の物理を議論する為の良いモデル系の一つとして考えられる。SWCNT系において、接合構造と薄膜物性との関係を調べる為には、SWCNTを配列させた薄膜の作製を行う必要がある。大面積の完全配向した配列膜を再現良く作製することは未だ困難な状況であり、配列したSWCNTでの物性研究に向けて、配列制御技術の向上を目的として本研究を行った。

配向膜の作製方法は既報の方法[1]を参考にした。界面活性剤に分散したSWCNTを希釈し、常圧下で自然ろ過を行う手法を用いた。配向の度合いの評価はラマン散乱を用いた。ラマン強度の偏光依存性を測り、その最大値と最小値の比を「配向度」と定義した。配向膜作製の滴下の際、溶液の表面張力により凹部が生まれるため、滴下の最後の部分の配向度は悪くなると考え、配向度の評価を薄膜の裏面で行った。すると、配向度が向上していることが分かった。局所的にSWCNTが配列していることが分かり、それを膜全体に一方向に人為的に配列させる為、溝本数が1200本/mmのグレーティングを利用しフィルターに溝をつけた後に配向膜作製を行うことを試みた。溝をつけた方向に、ラマンピークの最大値がくることが予想され、実際にその方向にCNTが配向させることが出来る結果を得た。

参考文献：[1] Xiaowei He *et al.*, *nature nanotechnology*, 11 633 (2016)

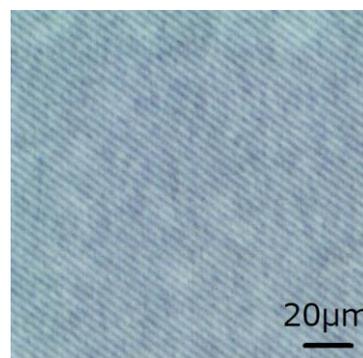


図 1 フィルター上にブレース構造をつけた写真

# フェルミレベル制御による熱電機構のクロスオーバー

表界面光物性研究室

吉田 朱里

柔らかい物質系における熱・電荷輸送を固体電子論を用いてどのように記述するかは物性物理学における課題の一つと考えられる。単層カーボンナノチューブ (SWCNT) は、非常に高い導電性、熱伝導性を備え、カイラリティによって金属型・半導体型の性質を持ち、特に半導体型は大きなゼーベック係数を持つことから、熱電変換材料として注目されている。また、構造がシンプルである点、系統的に電子構造が改変可能という観点から、“柔らかい物質系”の物理を議論するのに最適な試料の一つとして考えられる。SWCNT 薄膜における伝導は、チューブ間にファンデルワールス力で接合したナノ界面が存在するため、ホッピング伝導系と言われ、そこでの熱・電荷の輸送特性は、固体物理における金属伝導系あるいは半導体系において予想される振る舞いとは異なることが知られている。その物理的背景を解明するために、本研究では、フェルミレベルを制御することによって、キャリアがハイドープ・ロードープされた状態での半導体型 SWCNT 薄膜のゼーベック係数の温度依存性を調べることを行った。

まず、分離精製を行った半導体型 SWCNT 薄膜に対し、イオン液体を用いた電気二重層キャリア注入技術を用いて、キャリア注入量を制御した。更に、本研究では、低温でのゼーベック係数を測定した。

実験から、In-Band 領域においては、温度低下に伴いゼーベック係数は低下した。一方で、In-Gap 領域においては、ゼーベック係数は上昇した。すなわち、In-Band と In-Gap でゼーベック係数の温度依存性はクロスオーバーの関係になるという結果を得た (図 1)。

今後は、様々なフェルミレベルでの温度依存性の測定をし、そのメカニズムについて研究を進めていく予定である。

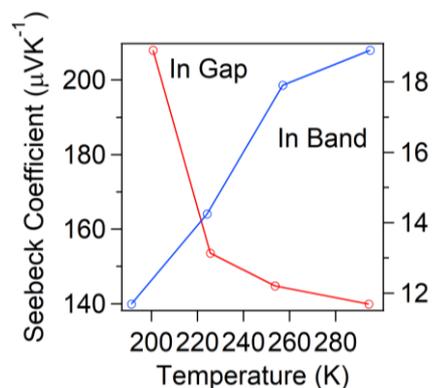


図 1 In Band と In Gap におけるゼーベック係数の温度依存性

# 二重井戸中のボーズ・アインシュタイン凝縮をした2成分 粒子系の振る舞い

量子凝縮系理論研究室  
藤田聖馬

絶対零度でボーズ・アインシュタイン凝縮をしたボーズ粒子は次のグロス・ピタエフスキー方程式に従うことが知られている。

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\Psi(r)+V(r)\Psi(r)+U_0|\Psi(r)|^2\Psi(r)=\mu\Psi(r)$$

グロス・ピタエフスキー方程式に従う粒子系を二重井戸型ポテンシャル中に置いたときには、粒子系は周期的な振動をすることが期待される。

この研究では、一次元および二次元に対し MATLAB を用いて実際にシミュレーションを行い、その振動の性質を明らかにした。

まず、図1のような一次元井戸型ポテンシャル中に2成分の粒子系の初期中心位置をそれぞれ対称に置き、原点にあるポテンシャルの壁を高くしていくにつれて、振動の周期がどのように変化していくのかをみた。その結果、壁の高さを高くするにつれて振動の周期が減少することが確かめられた。

次に、図2のような二次元井戸型ポテンシャル中に2成分の粒子系の中心位置を任意におき、時間の経過につれてどのような動きをするのかを検証した。

一次元二重井戸型ポテンシャル

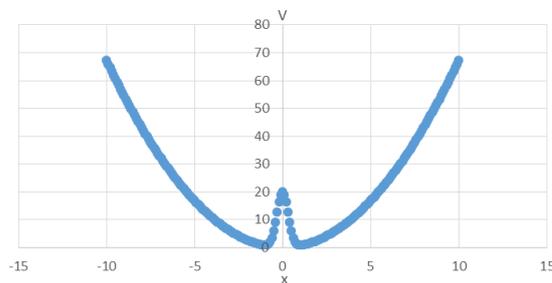


図1

二次元二重井戸型ポテンシャル

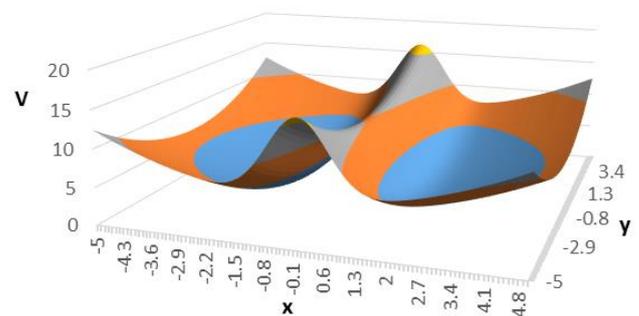


図2

参考文献：「二重井戸中の2成分ボーズ気体のジョセフソン振動」(修士論文，平原幹大)

# 超流動ヘリウムとその励起状態

量子凝縮系理論研究室

15163025 井口 義士

超流動とは相転移の一種であり、極低温における $^4\text{He}$  や $^3\text{He}$  が極めて高い流動性を示す現象のことである。著名な超流動現象として、フィルムフローやスーパーリーク、熱機械効果(噴水効果)などが挙げられる。本研究では主に $^4\text{He}$  の超流動について、その励起状態や超伝導との関わりをランダウの励起曲線やフォノン、ロトンそして渦糸等に関する先行研究を通じてまとめた。

ランダウ曲線から $^4\text{He}$  超流動には2種類の励起が存在していることが分かる(図1)。低エネルギー状態ではフォノンによる励起が、やや高エネルギーな状態ではロトンによる励起が支配的である。フォノン、ロトンの波動関数は簡単なモデルにおいてよく似ており、また中性子散乱の構造因子はランダウ曲線の実験的な導出に利用できることが知られている。[1]

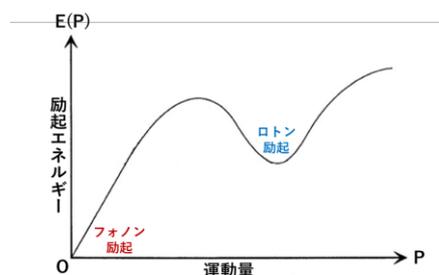


図1:ランダウ曲線の概形

渦糸の発生も超流動において非常に興味深い現象の一つである。超流動体が入った容器を回転させると、格子状に量子渦が生まれる(図2)。これは一部の超伝導体にも現れる現象であり、第二種超伝導体に磁場を加えると渦の格子が生まれその中を磁束が通ることができる。 $^4\text{He}$  超流動における渦糸「循環の量子化」と第二種超伝導体における渦糸「磁束の量子化」は本質的に非常に近い現象であることが分かっている。[2][3]

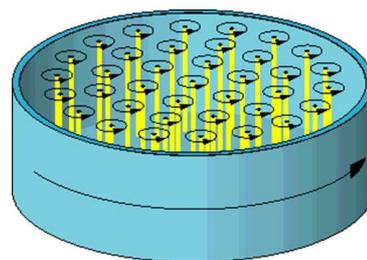


図2:渦糸の様子

## 参考文献:

- [1] 「ファインマン統計力学」R.P. ファインマン 監訳 西川恭治  
シュプリンガー・ジャパン株式会社 2009年
- [2] 「物性I」松原武生ほか 岩波書店 1978年
- [3] 「超伝導・超流動」恒藤敏彦 岩波書店 2001年

## 二粒子分光法による、BCS-BECクロスオーバー領域の対の性質の解析

量子凝縮理論研究室      12163063 高柳 雄太  
(担当教員) 荒畑恵美子

1995年に希薄アルカリ原子ボーズガスでボーズ=アインシュタイン凝縮が実現して以来、物理学上の次なる目標であったフェルミ原子ガスの超流動化が2004年に実現された。この新しい超流動はフェッシュバハ共鳴と呼ばれる従来とは異なるクーパー対形成機構で実現している。これは金属超伝導の電子で起こっているクーパー対形成とその凝縮が原子気体でも実現したことを意味する。フェッシュバハ共鳴で対形成のための相互作用を容易に変えられるため、超流動の性質が超伝導に代表されるBCS理論的なものから分子ボソンのBECの超流動へと連続的に移行する現象が観測されている。この現象はBCS-BECクロスオーバーと呼ばれ、電子系では見られない原子気体系特有の現象であり、従来別々に研究されてきた二つの超流動現象に対して統一的な舞台を提供するという利点から盛んに研究されている。

しかしながら、BCS-BEC クロスオーバー中の超流動を担う対がBCS的なクーパー対になっているのか、分子ボソンになっているのかといった対の性質についてはあまり研究させてこなかった。対の性質を明らかにする方法として二粒子分光法が提案されているが、その計算は煩雑である。

本研究では、二次の摂動から二粒子スペクトル密度の表式を簡略に導出し、超流動を担う粒子の性質を明らかにした。発表ではBCS領域からBEC領域に移るときの粒子スペクトル密度の変化について詳しく議論する。

# 超伝導状態のスピンエンタングルメントエントロピー

量子凝縮系理論研究室

15163029 横馬場優太

指導教員 大塚 博巳

超伝導とは主に以下の五つの特徴をもつ：1. 転移温度における二次相転移 2. 絶対零度付近で指数関数的に変化する電子比熱 3. マイスナー効果 4. 転移温度以下での電気抵抗ゼロ状態 5. 同位体効果を示す。1911年にOnnesによって発見されたこの特異な低温相に対して1957年にBardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) はその理論的説明を与えた[1]。BCS理論として今日知られているこの理論の中心は電子の対凝縮という考えでありそれを表す波動関数はBCS状態として広く知られている。

本研究ではBCS状態が所謂エンタングルメント状態であることや、その状態におけるスピンエンタングルメントエントロピー(SEE)の振る舞いを考察した[2]。解析結果からBCS状態はフェルミ面の大きさに比例した情報量を電子対間でやり取りしていることが分かった。具体的にSEEは以下のように表される

$$S_{\text{SEE}}^{\text{BCS}}(\Delta) \simeq - \int_{\epsilon} \left( |u|^2 \ln |u|^2 + |v|^2 \ln |v|^2 \right) D(\epsilon) d\epsilon \simeq \pi D(0) \Delta$$

尚、SEEの定義および計算の詳細については発表会当日詳述する。

[1] J. Bardeen, L.N. Cooper, and J.R. Schrieffer, Phys. Rev. 108, 1175 (1957).

[2] X.M. Puspupus, K.H. Villegas, and F.N.C. Paraan Phys. Rev. B 90, 155123 (2014).

# 連成振動の断熱サイクル

非線形物理研究室

今田 寛明

断熱サイクルは系が元に戻るということは物理学を習っている人にとって常識とされているかもしれない。しかし、そうはならないモデルを調べたので、これを報告する。

まず、本研究で参考とした量子的なモデルを紹介する。これは量子グラフと呼ばれるモデルで、長さ  $L$  の 1 次元空間中に質点が閉じ込められている場合を想定している。系を基底状態に用意した後で、左から長さ  $(L/2) - \epsilon$  のところで断熱的に切断する。続いて全体の長さを保ちつつ、左部の長さを  $(L/2) + \epsilon$  まで伸ばし、断熱的に繋げる。この結果、基底状態であった系は第 1 励起状態、つまりエネルギー準位が 1 つ上がった状態となる。

このような現象は古典力学でも起きるだろうか。そこで、次のモデルを考えた。バネでつなげた質点に断熱的に外力を与えるような状況を想定する。図 1 のようなモデルを考え、左からそれぞれ質点 1, 2, 3, 4 とする。初期状態は最も波長の長いモードから始める。次に、図 2 のように質点 2, 3 に断熱的に外力を加える。外力を加え終え、サイクルが終了した後の質点のそれぞれの軌跡は図 3 のようになり、波長が 2 番目に長いモードが見えた。つまり、断熱サイクルがモードを変化させることの証拠を得た。



図 1 バネでつなげた 4 つの質点(位置  $X_i$ )  
端は固定されている

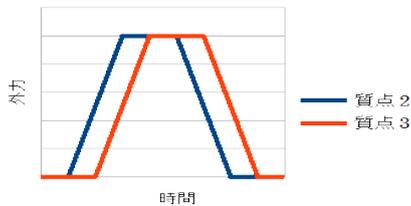


図 2 外力の時間依存性 質点  $i$  に外力  $\cdot F_i X_i$  を加える

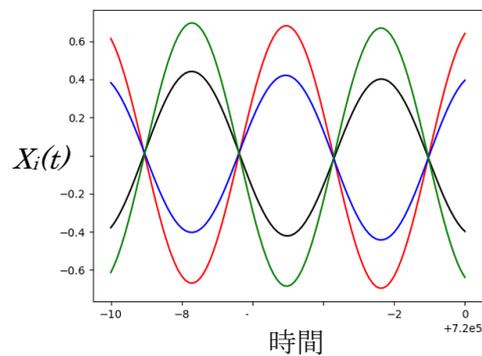


図 3 断熱サイクル完了後の質点の軌跡  
(赤 : 1、青 : 2、黒 : 3、緑 : 4)

参考文献 :

霞江 翔、卒業研究(2014 年度) ; S. Kasumie *et al.*, Phys. Rev, A **93**, 042105 (2016)

# 多準位 Landau-Zener モデルにおける拡散過程について

非線形物理研究室

中瀆光章

Landau-Zener 公式は、原子・分子衝突の解析を目的として、1932 年に Landau, Zener 等によって導入された[1, 2]。時間とともに限りなくゆっくりと変化する摂動の極限では、系がある状態から別の状態へ遷移する確率はゼロとなることが知られており、断熱定理とよばれる。しかしながら、摂動が有限の時間で変化するときには、断熱定理を破って断熱状態の間で遷移が起こりうる。この遷移を非断熱遷移という。このような遷移は断熱準位が擬交差しているところで局所的に起き、二準位 Landau-Zener モデル(透熱準位が時間について線形な二準位の非断熱遷移モデル)に対しては、Landau-Zener 公式を用いてその遷移確率を計算することができる。

多準位の非断熱遷移問題を扱う方法の一つとして、独立交差近似(二準位近似)がある。これは、擬交差点における遷移のそれぞれに対して Landau-Zener 公式を独立に適用するものである[3]。

本発表では、等間隔な透熱準位にランダムな摂動を加えた多準位 Landau-Zener モデルに対して、独立交差近似を naive に拡張したものを適用して計算した場合と、微分方程式を直接的に数値計算した場合とを比較する。拡張した独立交差近似を用いた場合は、エネルギー空間における確率分布について、分散が時間に比例する。これに対して、モデルを直接的に数値計算した場合は、エネルギーの分散が時間に単純には比例しないような拡散過程となることをみる。

## 参考文献：

- [1] L. D. Landau, Physik Z. Sowjetunion **2**, 46(1932).
- [2] C. Zener, Proc. Roy. Soc. Lond. A **137**, 696(1932).
- [3] 島田尚明, 多準位非断熱遷移問題の完全WK B 解析, 首都大学東京大学院理工学研究科修士論文(2017).

# 三角格子ローレンツガスにおける二段階緩和

非線形物理研究室

中原祥博

物理学の未解決な問題のひとつに過冷却液体からのガラス形成の原理がある。多くの先行研究から過冷却液体の持つ性質として、中間散乱関数などを調べると図1のような二段階緩和が現れることがわかっている[1]。二段階緩和が現れる原因は粒子が別の粒子に囲まれることによって粒子がその領域からなかなか抜け出せず粒子の拡散が妨げられるためである。囲んでいる粒子と囲まれている粒子の時間スケール比を大きくした系として、系に固定粒子と流動粒子が混在する、ランダムピンング系[2]があるが、固定粒子のランダムネスや流動粒子の多体性が本質的であるかは明確ではない。よって、これらの効果を排除した系の理解がまず必要と考える。

本研究では、三角格子状に障害物となる円盤を固定しその隙間を質点が円盤と衝突しながら飛行するローレンツガスモデルに対して自己中間散乱関数などを調べ、ガラス形成系で典型的に見られる二段階緩和が現れることを見出した(図2)。発表では、ガラス的な遅い緩和発生のミニマルな条件について議論したい。

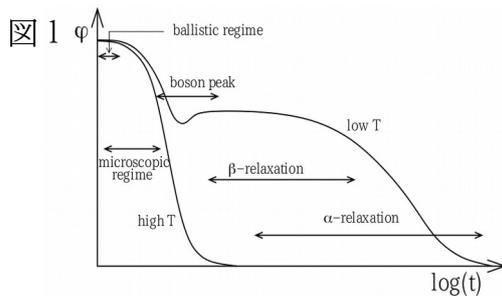


図1：典型的なガラス形成系における中間散乱関数 ([3]より転載)

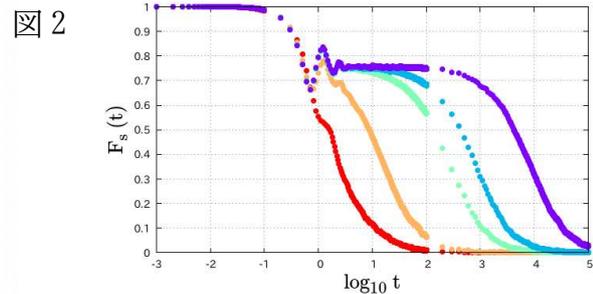


図2：本研究での自己中間散乱関数の結果 (赤：低密度、紫：高密度)

## 参考文献：

- [1] 宮崎州正, **物性研究** 88, 621 (2007).
- [2] K. Kim, K. Miyazaki, S. Saito, *EPL*, **88**(3), 36002 (2009).
- [3] W. Kob, “Supercooled liquids, the glass transition, and computer simulations”, Lecture Notes for “Slow relaxations and nonequilibrium dynamics in condensed matter”, Les Houches July, 1-25, 2002; Les Houches Session LXXVII; Eds. J.-L. Barrat, M. Feigelman, J. Kurchan, and J. Dalibard (Springer, Berlin, 2003). p.199-270