



東邦大学

2023 年度

東邦大学理学部物理学科

卒業論文予稿集

卒業論文発表会

2024 年 2 月 9 日（金）・10 日（土）

発表プログラム:

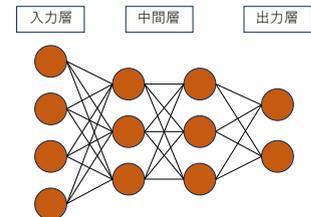
https://www.toho-u.ac.jp/sci/ph/course/ceremony/phy_event/029473.html

物性理論教室

1 多層パーセプトロンを用いた機械学習の研究

岸田 亮汰

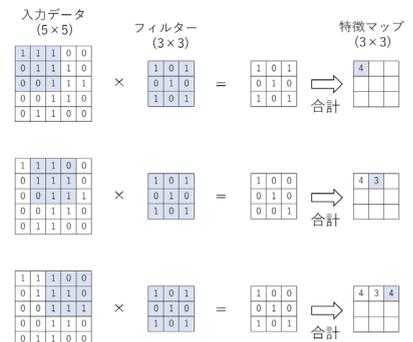
本研究では、多層パーセプトロンを用いた機械学習プログラムを作成し、2 値問題を解くことで学習パラメータが正答率に与える影響を確認する。2 値分類問題を解くプログラムを作成し、排他的論理和 XOR 回路を多層パーセプトロンを使って解いた。使用する活性化関数や誤差関数や各種パラメータがどのように正答率に影響を与えるかを議論する。



2 畳み込みニューラルネットワークを用いた機械学習に関する研究

石井 遥

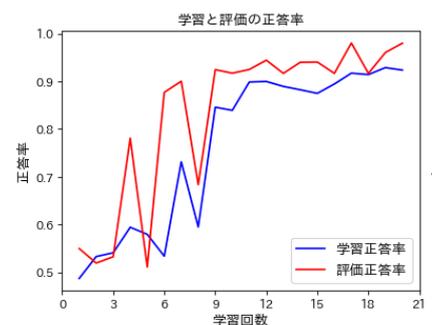
本研究では、畳み込みニューラルネットワークを用いて、スピン波の画像を解析し、スピン波の属する相を機械学習により判別した。畳み込みニューラルネットワークを実装した結果、学習回数と学習率を変化させときの正答率を調べた。バッチサイズは大きくするほど正答率が一定になるまでの学習回数が多くなり、小さすぎると学習が上手くいかないことが確認できた。また、スピン波のエネルギーを変化させることで、スピン波の属する相が変化することが確認出来た。



3 Vision Transformer を用いた機械学習に関する研究

関口 さくら

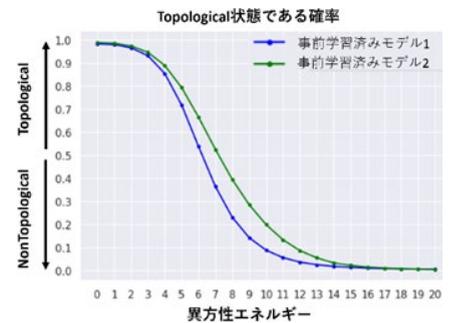
本研究では Vision Transformer (ViT) と呼ばれる機械学習アルゴリズムを用いて画像の判別を行った。判別する画像としてスピン波の波動関数を用い、そのスピン波の属する相を判別させた。学習回数、Attention 機構の行列サイズなどの機械学習のパラメータを変化させ、正答率と誤差、推測結果がどのように変化するか調べた。計算の結果、Attention 機構の行列サイズと繰り返し数、入力での画像分割数で正答率が大きく変化し、学習回数、Attention 機構での画像分割数を変化させても正答率はあまり変化しないことが分かった。



4 ファインチューニングを用いた Vision Transformer モデルによるスピン波の画像判別

鎌倉 秀飛

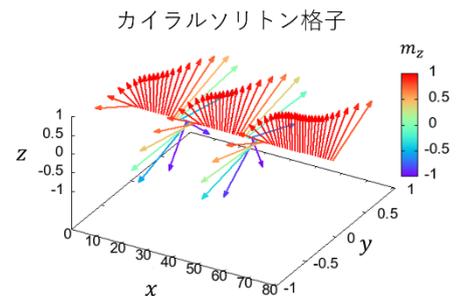
本研究では機械学習の画像分類分野で新たに提案された Vision Transformer(ViT)を扱った。ファインチューニングという手法を用いて ViT での学習を行い、スピン波の画像判別を行った。学習回数、学習率の設定とファインチューニングに用いる事前学習モデルの変更による判別結果の変化を調べた。結果としてファインチューニングにおいて学習回数による結果の変化は小さく、学習率の変化による変化は大きいことが分かった。また、事前学習済みモデルの変化によって、異なる判別結果が得られた。



5 一軸らせん磁性体中の磁化構造に対する数値的研究

中西涼太

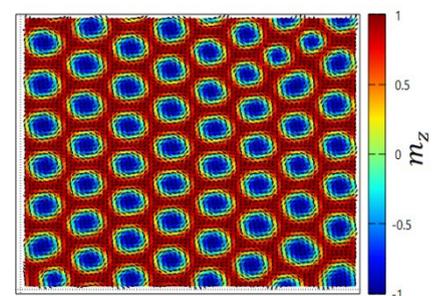
本研究では、磁化ダイナミクスを表す Landau–Lifshitz–Gilbert(LLG)方程式を数値的に解くことによって、磁化構造のシミュレーションを行った。らせん磁気構造のらせん軸に垂直に外部磁場を加えることによって、カイラルソリトン格子をつくった。また加える外部磁場を変化させることによって、磁化曲線のヒステリシス構造が現れることを示した。その磁化構造のエネルギーを計算することによってヒステリシス構造の要因である表面バリアを確認した。



6 磁気スカーミオンの異方性エネルギーによる磁気構造の変化

椿龍人

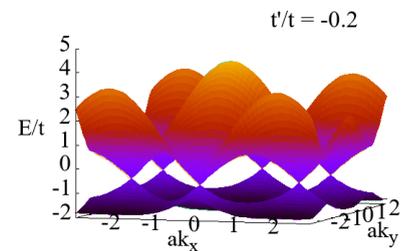
本研究では2次元平面に形成された磁気スカーミオンと呼ばれる磁気渦構造に対する異方性エネルギーの効果調べた。磁気異方性を平面に対して垂直に課した場合、磁気構造とスカーミオンを特徴づけるスカラーカイラリティの分布がどのように遷移するかを数値計算を用いて調べた。計算の結果、異方性エネルギーを容易軸方向に大きくするほどスカーミオンの半径は小さくなり、困難軸方向に増加することによって反対符号のトポロジカルチャージが現れることが分かった。



7 グラフェンの強束縛模型における状態密度

大村修平

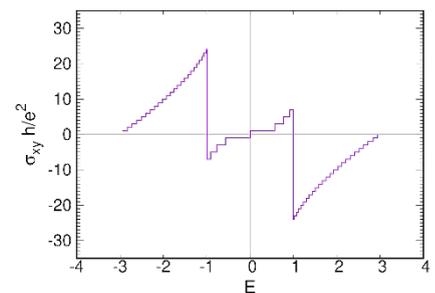
本研究では、グラフェンの強束縛模型におけるエネルギー固有値を導出し、状態密度を数値計算によって求めた。最近接相互作用のみの強束縛模型に加えて、次近接まで相互作用がある場合についても数値計算を行った。最近接格子作用のみの場合には、エネルギーバンドが対称性が見られ、ゼロエネルギー付近で状態密度が線形であることが確認できた。次近接を考慮すると、エネルギーバンドに非対称性が見られ、また状態密度のエネルギーの線形な部分にずれが生じるなどの変化を確かめられた。



8 強磁場中の強束縛模型におけるトポロジカル量子数の計算

富田樹

本研究では、2次元正方格子の強束縛模型におけるホール伝導度の数値計算を行った。ホール伝導度はチャーン数と呼ばれるトポロジカル量子数で表すことができる。このチャーン数を福井らの計算手法を用いて求めた。2次元正方格子の一部の飛び移り積分を六角格子や π フラックス模型になるように変化させていったときに、ディラック電子系で見られるようなホール伝導度の振る舞いがより広いエネルギーの範囲で見られることを確認した。

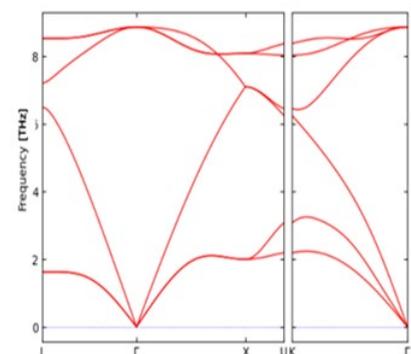


六角格子模型におけるフェルミエネルギーに対するホール伝導度

9 Quantum ESPRESSO と Phonpy を用いた第一原理フォノン計算

大木謙志郎

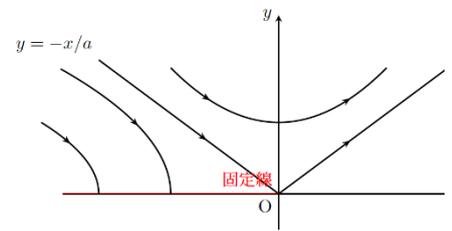
本研究では、Quantum ESPRESSO と Phonpy を用いて第一原理フォノン計算を行った。計算に使用した物質は Ge であり、フォノンバンド構造、状態密度、熱特性を計算した。また、計算に使用したスーパーセルの大きさを変えた場合、計算結果がどのように変化するかを $2 \times 2 \times 2$ スーパーセルと $2 \times 2 \times 4$ スーパーセルを用いた結果を比較することにより確認した。



10 2次元 XY 模型における Berezinskii-Kosterlitz-Thouless 転移のくりこみ群解析

宮武功聡

BKT 転移とは自由な位置に渦が発生することによって準長距離秩序が破壊され、KT 相から常磁性相に転移する相転移である。本研究ではこの相転移について 2 次元 XY 模型のハミルトニアンを低温展開、また渦が符号が対となるように二つ発生する場合を考えることで BKT 転移のくりこみの式 (BKT 方程式) を導出した。またこの式を解くことで温度が高温側から転移点に近づくと指数関数的な発散を示すことを示した。



素粒子物理学教室

1 超微粒子原子核乾板による地下環境中性子測定に向けた小型ラドン検出器と活性炭フィルターを用いた空気中ラドン除去性能の評価

間仁田省吾

超微粒子原子核乾板を用いた環境中性子測定をグランサツ研究所にて推進しており、その測定の MeV 帯において空気中のラドンが α 線背景事象として混入することが分かっている。原子核乾板の製造過程における空気からのラドン混入を防ぐため、活性炭を用いたラドンフィルターを検討している。小型ラドン検出器を用いた実験セットアップを構築し、フィルターのパスの長さによるフィルター性能評価を行った。ラドン除去性能は活性炭フィルターにおいて 77% の除去することができた。

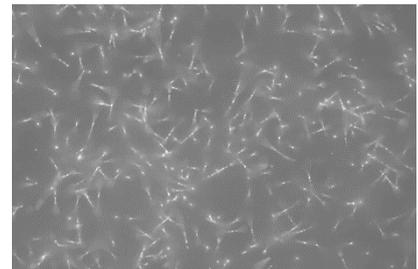


小型ラドン検出器

2 超微粒子原子核乾板のAgBr結晶内のヨウ素ドーピング量に対する放射線感度の基礎評価

石原大樹

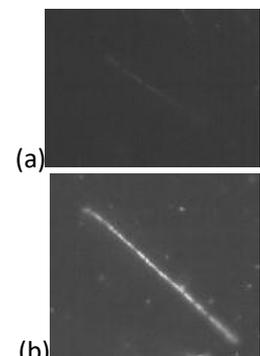
昨今、世界各地では様々な暗黒物質モデルの直接観測を試みており、近年では Boosted Dark Matter と呼ばれる低質量で高エネルギーの暗黒物質が注目されている。NEWSdm 実験では原子核乾板を用いて暗黒物質の直接観測を目指している。新たに開発された超微粒子原子核乾板 (NIT) は優れた粒子識別能を持つが、背景事象の削減など様々な課題が残っている。NIT の AgBr 結晶内にはヨウ素が少量ドーピングされており、荷電粒子が通過した際に生成される正孔を捕獲し潜像核形成の一助となっている。本研究では AgBr 結晶内のヨウ素ドーピング量を減らし Boosted Dark Matter を想定した炭素イオン及び背景事象を想定した γ 線を照射し、基礎評価を行った。電子及び炭素イオンの相対検出効率において有意な結果を得ることができた。

 α 線の飛跡

3 超微粒子原子核乾板における放射線飛跡の光学輝度上昇に向けた現像液の検討と評価

染谷一輝

原子核乾板の空間分解能は構成する AgBr(I) 結晶のサイズが小さいほど高くなるが、光学顕微鏡での飛跡の光学輝度は小さくなる。現在、結晶サイズが 70nm の NIT を使用しているが、さらに空間分解能を上げるため結晶サイズが 40nm の NIT を使用すると、飛跡の光学輝度が低く、飛跡認識効率の低下が課題となっていた。そのため、従来の現像液から新しい現像液に変更し、光学輝度を上げなければならない。本研究では、40nm の NIT を製造し、現像液を従来の標準現像液の化学現像を主体とする現像液である MAA から、溶解物理現像を主体とする Reversal 現像液の特性に注目し、評価した。その結果、同じ現像時間での光学顕微鏡での飛跡輝度が従来の現像液 (右写真(a)) のときより約 7.1 倍の上昇 (右写真(b)) を確認した。

 α 線飛跡 ((a)MAA で現像、(b)Reversal で現像)

4 タウニュートリノ・反タウニュートリノ識別のための検出器の性能評価

鈴木智哉

SHiP 実験は、Hidden Particles の探索と $\nu_\tau \cdot \bar{\nu}_\tau$ の識別や詳細研究を目的とした国際共同実験である。東邦大学ではニュートリノ検出器である CES の開発を行っている。本研究では、宇宙線照射実験を通して得られた飛跡を解析しサジッタを求めることで、CES の性能評価を行った。



HTS による scan の様子

5 Cosmo-Z を用いたミュー粒子の平均寿命測定

乗松孝英

ミュー粒子は弱い相互作用によって約2.2ナノ秒の寿命で崩壊し、電子を生成している。その平均寿命は3枚のシンチレータと金属板を用いて、シンチレータから送られてくる電圧変化を読み取ることで測定できる。本研究では入力信号の波高が閾値指定した値を下回った場合のみの波形を取り出し、その波形の時間と電圧変化を数値で捉え、ミュー粒子の平均寿命の測定を行った。

6 月面ガラス試料の宇宙線によるダメージトラック解析に向けた基礎研究

齋藤優心

鉱物などの結晶格子中に高速正荷電粒子が入射した場合、クーロン相互作用によって爆発的に反発し、格子中にトラックとして損傷が見られる。これにエッチング処理を行うと、右図のように顕微鏡での観測が可能になる。そのため、自然界の鉱物は数億年スケールの情報を保持しているため、解析することに非常に意義がある。本研究では、今後月面サンプルを持ち帰る機会が増えていくことを考え、基礎研究として月面ガラス試料の代わりに人工ガラスをターゲットにしてのイオンビーム照射実験を行った。結果としては、Xe (38GeV) 照射時でガラス侵入時の阻止能が $38 \sim 58$ [MeV/mg/cm²]、検出効率は約 5 % であり、Fe (70MeV) 照射時では阻止能 31 [MeV/mg/cm²]、検出効率が約 50 % であった。また、エッチング後のトラック横幅の分布を測定することで間接的にガラス表面での電離損失分布を測定しているのではないかと予想される結果を得ることができた。



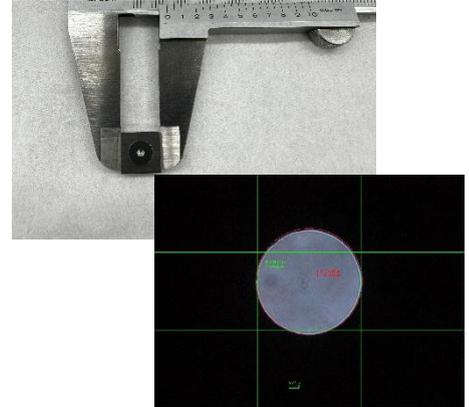
エッチング後のガラス表面の様子

7 超微粒子原子核乾板NITでのマイクロイオンビーム評価に向けた α 線飛跡による角度精度の評価と歪み改善の検討

鈴木大貴

ガラス製の注射針であるガラスキャピラリーを用いてマイクロイオンビームが生成できる。内部でのイオンビーム輸送経路を理解する為、超微粒子原子核乾板への照射を行いプロファイルや角度分布によるバックトレースを試みた。しかし検出された飛跡にはディストーションと呼ばれる歪みが多く含まれており、正確なバックトレースを行うことができなかった。

そこで、微小内径の穴を開けた絞りであるアパーチャーを新たにデザインすることで、歪みの角度評価が可能な体系を構築した。さらに、複数の濃度の異なるビニルスルホン系硬膜剤の添加を行うことで歪みの改善を試みた。結果として硬膜材の添加による有意な歪みの改善はみられなかった。



アパーチャー外観(左)と内径(右)

原子過程科学教室

1 チタンの X 線吸収特性を用いたサムピーク除去法によるステンレス鋼表面ウラン汚染の XRF 分析

氏名 柳澤 右京

ステンレス鋼を蛍光 X 線 (XRF) 測定すると、鉄に由来するサムピークが観測される。このサムピークは U La 線と重なるため、ステンレス鋼表面のウラン汚染を XRF 分析することは困難である。本研究では、チタン箔をステンレス鋼表面のウラン汚染部位に重ねることで、チタンの X 線吸収特性を用いて、サムピークを除去する方法の検討を行った。

実験の結果、15 μm のチタン箔を用いることで、サムピークを除去することに成功し、ステンレス鋼表面ウラン汚染の XRF 測定を可能とする結果を得た。また、従来法である α サーベイメーターの約 100 倍の感度を達成した。

2 パルス電子銃における電子の収束率向上に向けたシミュレーション

氏名 村杉 廉

本研究室では、散乱電子-イオン同時計測法を用いて、これまでに水素分子や窒素分子などの二電子励起状態の崩壊過程の研究を行ってきた。しかし電子を効率よく発射させることができず、実験に多くの時間がかかってしまっていた。そこで、本研究では入射電子電流を増やすために SIMION を用いて電子銃内外の電子のシミュレーションを行った。その結果、以前までは 0.6 nA ほどしか電子が電子を発射させることができていなかったのに対し、5 倍以上となる 3.0 nA 以上もの電子を発射させることができた。これは、実験時間が 1/5 以下になることを意味する。

3 散乱電子-イオン同時計測装置のための計測システムの作成

氏名 永井 友望

本研究室では、二電子励起状態に着目し、その励起状態の性質や崩壊過程の研究を電子衝突による散乱電子-生成イオンの同時計測実験によって行ってきた。実験では、散乱角を固定して電子エネルギー損失スペクトルを得、同時にイオンの生成量の同時測定を行う。しかし、使用していた電子エネルギー損失スペクトルをとるためのマルチチャンネルスケーラー(MCS)の故障により、実験ができなくなっていた。そこで本研究では、National Instruments によって開発されたソフトウェア商品である LabVIEW とハードウェア商品である DAQ デバイスを用いて、散乱電子-生成イオン同時計測実験のための計測システムの開発を行った。

4 二方向二段デフレクターを用いた簡易質量分析計

氏名 小西 凌也

本研究室ではイオン付着飛行時間分析(TOFIA)法による質量分析装置の開発研究を行っている。TOFIA では低速イオンが直線的な軌道を持たないという問題点があった。そこで二組のデフレクターを用いて、直線的なイオンを導入できる方法が考案され、C 言語とイオン光学設計ソフトを用いたシミュレーションが行われた。それらを踏まえ、今年度は装置の実現に向けたパルスの立ち上がりや進行方向に直交する二軸を考慮したシミュレーションを行った。その結果、二軸を考慮すると各電極の影響で電場の歪みが大きく、実際に用いるには補正電極が必要であることがわかった。

5 直交型イオン付着飛行時間型質量分析装置のための検量線作成の試み

氏名 福田 拓馬

本研究室で開発されたイオン付着飛行時間型質量分析装置は、対象試料分子を壊さず(フラグメントフリー)に検出することが可能な装置であるため、呼気分析に適用できる。これまでに原理的な実験には成功し、測定感度、分解能の向上を図っている。本研究では、本装置で定量分析が可能か否か調べるために、呼気中の疾患と関係がある物質の中で付着効率の良いアセトンを用いて検量線作成を試みた。その結果、線形型では描けた検量線が、直行型の本装置ではうまく描けず、標準試料の作成方法等に問題がある可能性はあるが、現状では定量分析には適さないことがわかった。

6 直交型イオン付着飛行時間型質量分析装置における簡易 RF カーペットの効果

氏名 小林 紳一郎

本研究室で開発を進めている直交型イオン付着飛行時間型質量分析装置は、気相試料を壊さず(フラグメントフリー)に検出可能である。その特徴を生かし、呼気分析への応用を目指しているが、現在の装置では呼気中に含まれる疾患と関連のある物質の濃度である ppm レベルの検出は難しい。そのため、検出感度の向上のため高周波電圧を印加する「簡易 RF カーペット」が考案された。本研究では、簡易 RF カーペットの最適な設定を見出し、検出感度の向上を目指した。結果として、検出量が最大で 1.2 倍程度となる設定を得ることに成功した。

7 炭素分子負イオン C_9^- が放つ再帰蛍光の減衰測定

氏名 横山 寧々

孤立環境下にある分子の冷却過程は、宇宙空間における分子の合成進化にも関わる重要な物理事象である。近年、従来知られた過程よりも遥かに急速な冷却過程として、内部転換の逆過程である逆内部転換に続き可視・近赤外光を放出する再起蛍光が炭素分子正・負イオンや多環芳香族炭化水素正イオンで確認され、注目を集めている。特に炭素分子負イオンでは、これまで構成炭素数が偶数である $C_{4,6,8}^-$ で再帰蛍光が直接観測されていたが、近年に炭素数が奇数の C_9^- で再帰蛍光放出が確認され、偶奇性の逆転として興味を持たれている。本研究では、この偶奇性逆転が起こる炭素分子負イオン C_9^- に着目し、波長ごとに再起蛍光の減衰測定を試みた。

8 β 崩壊の核刺激脱離による反跳イオンビーム生成の研究

氏名 飯田 葉吏

ウランよりも原子番号 Z の大きな超ウラン領域 ($Z > 92$) の原子核において、核構造が特異的に安定となる「安定の島」の存在が予言されている。既存の技術では困難な安定の島近傍核の生成・研究を目指し、安定の島に至る超ウラン領域核の系統的な精密質量測定による核子結合エネルギーや安定性の研究が期待されている。

本研究では、超ウラン未開拓領域の精密質量測定に不可欠な高純度イオンビーム生成法を開発した。 α 崩壊など放射性崩壊に伴う娘核反跳を利用した吸着表面からのイオン脱離「核刺激脱離」に着目し、ラジウム ($Z = 88$, Ra) 同位体 ^{225}Ra の β 崩壊による金属表面からの核刺激脱離イオン生成・輸送の実証実験を行った。

量子エレクトロニクス教室

1 デュアルコム分光法を用いたアセチレンガスの分光測定

本研究ではデュアルコム分光システムを用いてアセチレン($^{12}\text{C}_2\text{H}_2$)ガスの分光計測を行った。アセチレンガスの振動回転準位を同時に測定するためにデュアルコム分光システムを調整し、1510~1550 nm 域における吸収スペクトルを測定した。取得した吸収スペクトルを簡易的に規格化する簡易規格化を行い、従来法との比較・検討を行った(Fig. 1)。また、取得した規格化スペクトルの各吸収線間隔からアセチレンガスの回転定数 B を算出した。最後に、簡易規格化手法によって取得した規格化スペクトルを吸光度スペクトルに変換することで、スペクトル解析によるガス分子温度計測を行った。解析から求められた温度は実際の実験室での温度に対して ± 2 °Cの範囲で決定することができた。

氏名 武子 尚生

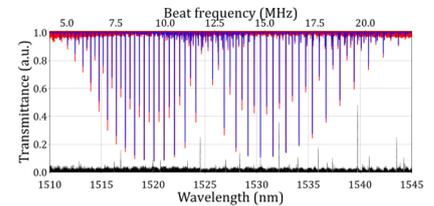
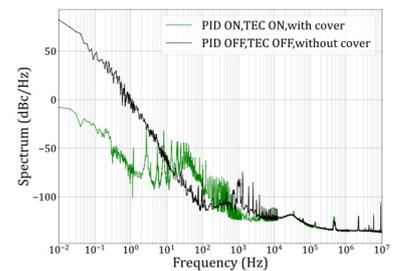


Fig. 1 Comparison of HITRAN (blue) and Measured data (red)

2 繰り返し周波数の安定化制御可能な光周波数コム光源の開発

本研究では光周波数コムを用いた高速・高分解能な分光システムの構築を目指して、電気光学位相変調器 (EOM) の組み込みが可能なモード同期 Er ファイバレーザによる光周波数コム光源を開発した。EOMを組み込むために、レーザ共振器の一部に自由空間部を設け、モード同期機構に非線形偏波回転を用いることで、繰り返し周波数 f_{rep} が 80.1 MHz の光周波数コムを波長 1550 nm 域において発生した。次に、 f_{rep} の安定化を行うために、レーザ共振器に圧電素子 (PZT) を組み込み、位相同期による制御系を構築した。Fig. 1 に示すように、 f_{rep} を安定化した場合 (緑線) と安定化していない場合 (黒線) の位相雑音が減少している結果を得た。以上の結果より、開発した光周波数コム光源による f_{rep} の安定化制御に成功した。

氏名 坂井 優己

Fig. 1 f_{rep} の位相雑音
パワースペクトル

3 非線形偏波回転型モード同期を用いた全偏波保持型ファイバレーザの開発

本研究では、全偏波保持 (All-PM) ファイバ構成での非線形偏波回転モード同期を採用したファイバレーザの開発を目指した。偏波保持ファイバ (PMF) では偏波が固定されるため、非線形偏波回転型モード同期の実現が不可能である。そこで、相当する位相シフトを発生するために、偏波保持 Er 添加光ファイバ (EDF) の融着軸をずらす手法を試した (EDF1, 2, 3)。さらに、安定なモード同期動作を実現するために、可飽和吸収体ミラー (SESAM) を併用した。これにより、All-PM 構成でのモード同期が可能なファイバレーザを実現した。

氏名 武藤 優輝

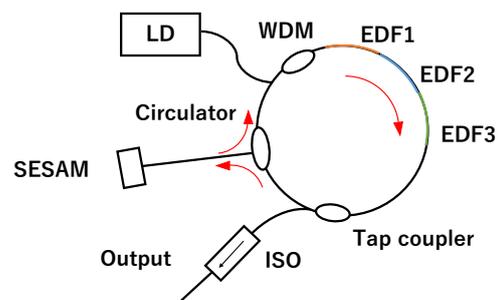


Fig. 1 全偏波保持ファイバレーザ

4 狭帯域光バンドパスフィルタを用いた広帯域 Er ファイバ増幅器の開発

氏名 吉岡 拓馬

ファイバレーザーは固体レーザーと比べて小型で堅牢かつ、ビーム品質がよいという利点がある。中でも、利得媒質にエルビウム(Er)を添加したエルビウム添加光ファイバ(EDF)を用いたモード同期 Er ファイバレーザーは、高速光通信に広く活用されている。光周波数コムに応用に対し、光周波数コムは広帯域かつ高強度であることが求められる。本研究では、Er 添加光ファイバ内における利得管理非線形増幅 (GMNA) を用いた光周波数コムの高帯域増幅の実証を目指した。Fig. 1 に示すのは、GMNA のために発生したフーリエ変換限界パルスの自己相関波形である。

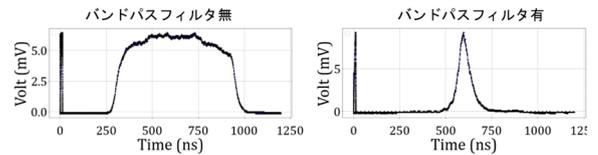


Fig. 1 分散補償ファイバにより時間伸長されたパルスの自己相関波形：(左図) 狭帯域光バンドパスフィルタが無い場合、(右図) 狭帯域光バンドパスフィルタがある場合

5 直線偏光を用いた Ba 原子の $6s5d^1D_2-5d6p^1D_2$ 遷移におけるシュタルク効果の測定

氏名 本橋 拓磨

本実験では、過去に測定を行った Ba 原子の $6s5d^1D_2-5d6p^1D_2$ 遷移を再測定した。直線偏光板を用いて π 光、 σ 光を生成し、高電場を印加することで、 σ 遷移を含むすべての π と σ の遷移の測定に成功した。また、以前に分解できなかった下準位のシュタルク分岐を分解し、考慮することができた。高分解能レーザー分光を用いて、シュタルク分岐とシュタルクシフトを測定し、Ba 原子の $6s5d^1D_2-5d6p^1D_2$ 遷移におけるテンソル分極率、スカラー分極率を再決定した。

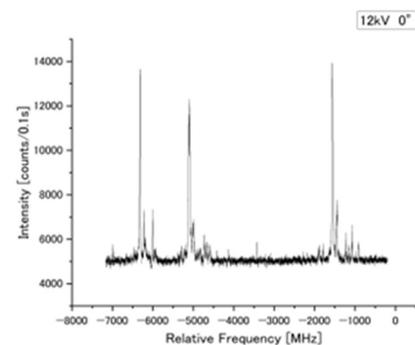


Fig. 1 σ 光によるシュタルクスペクトル

6 高分解能レーザー分光による Ba 原子の $6s5d^1D_2-5d^1D_2$ 禁止遷移の分極率の測定

氏名 宮内 駿

本実験では、外部共振器型半導体レーザーを用いた高分解能レーザー分光法によって、Ba 原子の $6s5d^1D_2-5d^1D_2$ 禁止遷移のシュタルク効果の観測を行った。レーザー光の偏光軸を調整することで、電場印加による Stark-induced mixing を用いて π & σ 遷移のスペクトルの観測に成功した。そのシュタルクシフト及び分岐から上準位 $5d^1D_2$ のテンソル分極率 α_t を $4.801(20)$ MHz/(kV/cm)²、同遷移のスカラー分極率 $\Delta\alpha_s$ を $4.754(38)$ MHz/(kV/cm)² と決定した。

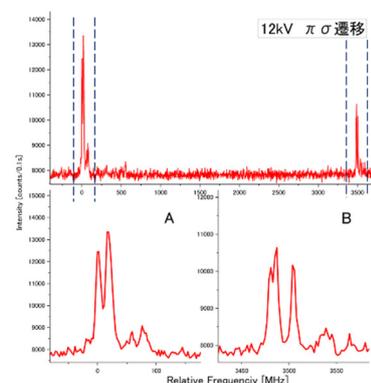


Fig. 1 高電場での π & σ 遷移のシュタルクスペクトル

7 ガラスキャピラリーを用いたレーザーマイクロビームにおける透過縞に関する研究

氏名 宮本 誠隆

我々は、今後の医療の発展に向けテーパー型ガラスキャピラリーを使用した MeV イオンと光のマルチ量子マイクロビームの照射方法に関する研究を行っている。本研究においては、可視光レーザービームの透過縞の強度と拡がり測定した。異なる出口径(50~90 μm)のガラスキャピラリーを製作し透過縞の 0 次スポットに対する、1 次、2 次明線リングの相対強度、各次のピーク幅、スポット幅と出口径との関係を調べた。その結果、相対強度、ピーク幅は出口径に依存していないことがわかった。

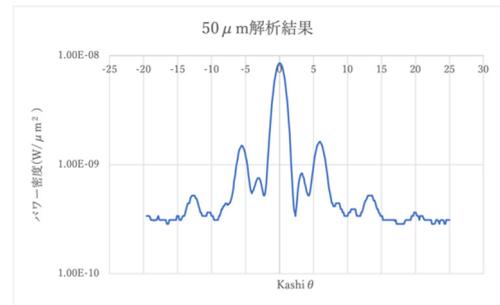


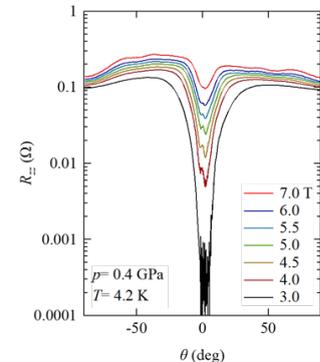
Fig.1 出口径 50 μm の
ガラスキャピラリーによる測定結果

物性物理学教室

1 有機超伝導体 β -(BEDT-TTF)₂I₃ におけるジョセフソン磁束ダイナミクス

益村 飛翠

2次元性が強い超伝導体に磁場を層平行方向にかけると、超伝導の層間にジョセフソン磁束が形成される。一方、ジョセフソン磁束は異方的三次元層状超伝導体には形成されない。本研究では、有機超伝導体 β -(BEDT-TTF)₂I₃ を題材に、層間磁気抵抗測定から超伝導コヒーレンス長が層間の格子定数と同程度である系に、ジョセフソン磁束は形成されるかという問題に取り組んだ。結果、ジョセフソン磁束形成に伴う層間磁気抵抗のピーク構造を検出した。さらに、層間磁気抵抗の四回対象磁場包囲依存性から、 β -(BEDT-TTF)₂I₃ は d 波超伝導体であることが示唆された。

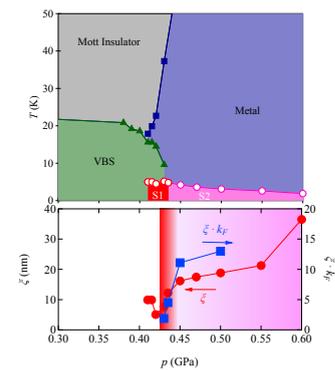


層間磁気抵抗の磁場角度依存性

2 分子性導体 EtMe₃P[Pd(dmit)₂]₂ における磁場に強い超伝導状態

鈴木 愛莉

分子性導体 EtMe₃P[Pd(dmit)₂]₂ は Valence Bond Solid (VBS) から超伝導への転移が発見された。本研究では、電子対を形成した VBS 相が超伝導発現にどのように関与するのか、どのような特徴があるのかという問題に取り組み、この物質における圧力下輸送特性を詳細に調べた。結果、超伝導コヒーレンス長は非常に短く、ボーズアインシュタイン凝縮 (BEC) 超伝導状態と BCS 超伝導状態のクロスオーバー状態にあることが示唆された。そのため、パウリ極限を超える非常に高い上部臨界磁場を持つことがわかった。一方、加圧で VBS 状態を抑制して出現する、金属相からの超伝導状態は非常に低い上部臨界磁場および長い超伝導コヒーレンス長をもつ BCS 超伝導状態であることが示唆された。

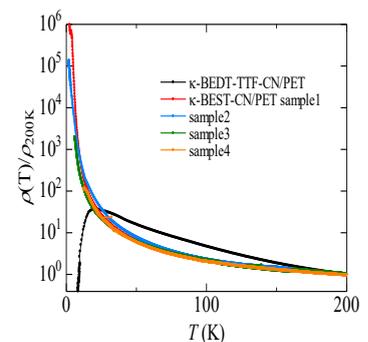


温度-圧力相図と超伝導コヒーレンス長の圧力依存性

3 有機モット絶縁体 κ -(BEDT-TTF)₂Cu₂(CN)₃ におけるセレン誘導体置換効果

早乙女 真秀

バンド理論で、金属になるはずの物質が電子間の斥力によって絶縁体状態のことをモット絶縁体と呼ぶ。単位胞あたりの電子が奇数になった場合、エネルギーバンドを部分的に占領して、本来なら金属的になるが、電子間に働くクーロン斥力のために局在して電気伝導を示さず、絶縁体になる。本研究では電気伝導を担う BEDT-TTF 分子を類似した分子に替えることによる化学的圧力の効果を調べた。具体的にはモット絶縁体 κ -(BEDT-TTF)₂Cu₂(CN)₃ の BEDT-TTF 分子を、分子中の硫黄の一部をセレンに置換した BEDT-STF 分子に置き換えることによる化学的な圧力効果を調べた。

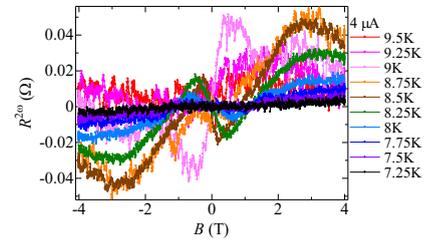


電気抵抗の温度依存性

4 有機超伝導体 κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Clと κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Brにおける非相反伝導現象

布施 晴輝

均質な結晶中で起こる整流現象である非相反伝導現象が様々な物質で発見され注目を集めている。この現象は超伝導転移温度付近で巨大化し、スピン軌道相互作用が大きい物質で発見されていたが、スピン軌道相互作用が小さいとされている有機導体では観測されていないため、有機モット絶縁体で超伝導相へ相転移する κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Clと κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Brにおいて2倍の周波数成分の磁気抵抗を測定したところ、面内磁場の場合に非相反抵抗が確認され、非相反伝導現象の係数もこれまで知られている超伝導体と同程度の値をとり、超伝導転移温度付近でピーク構造をとることも一致した。この結果から、有機導体でも面内磁場であれば無機物質と同様の非相反伝導現象が観測できることが示された。

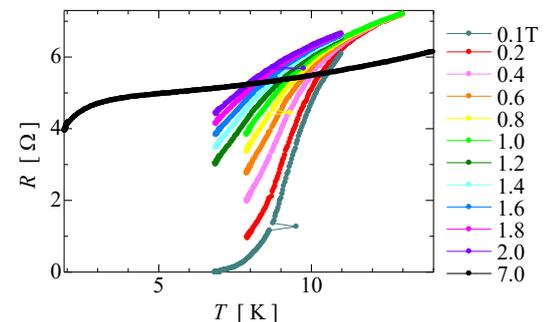


高調波成分の磁気抵抗

5 薄形状有機超伝導体におけるコヒーレンス長の磁場角度依存性

板倉 望

導体に磁場を印加したときの電気抵抗の変化（磁気抵抗）は、物質のバンド構造や乱れの程度、超伝導状態の有無など多彩な情報を含んでおり、最も基本的な測定対象のひとつである。さらに磁場の角度によって電子の運動方向を変えることができるため、磁場角度依存性を測定することで導体の次元性に関する情報を得ることができる。本研究ではステッピングモーターを用いて導体の電気抵抗の磁場角度依存性を測定することができるプローブを立ち上げ、コンピュータ制御で磁場に対する試料の角度を回転させるプログラム作成を行った。それを用いて有機超伝導体薄膜試料のコヒーレンス長の角度依存性を測定し、バルク試料に関する先行研究と矛盾しない結果を得た。



上部臨界磁場の測定

6 有機超伝導体を用いたねじれ2層超伝導接合作製の試み

松田 陸

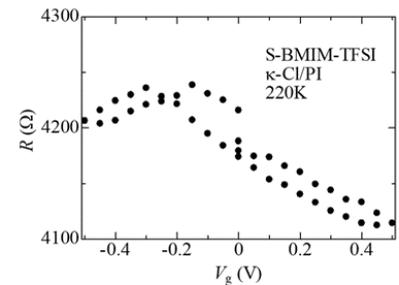
本実験では、有機超伝導体を用いたねじれ2層超伝導接合作製の試みを行った。使用する有機導体は電解法を採用し、結晶合成を行った。また、測定方法は4端子法を採用した。 κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Cl/ κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Cl、 κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Br/ κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Br、 κ -(BEDT-TTF)₂Cu(NCS)₂/ κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Brの組み合わせで実験を行った。 κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Clの実験結果では、超伝導転移は観測できなかった。また、残りの2つの組み合わせでは、超伝導転移は観測できたが、ゼロ抵抗は観測できなかった。

 κ -Br/ κ -NCSの重ね合わせ

7 キラルイオン液体を用いた電気二重層ドーピング

宇井 翼

キラリティ誘起スピン選択制(CISS)を利用して有機導体のスピン偏極率を制御することを目標として、キラルなイオン液体を用いた有機導体 κ -(BEDT-TTF)₂Cu(N(CN)₂)Clの電気二重層トランジスタ(EDLT)を作成し、まずはキャリア注入による電気抵抗の制御を試みた。ゲート電圧をかけると-0.2Vをピークに両極性電界効果トランジスタのふるまいが観測され、電子および正孔注入による電気抵抗の制御に成功した。電子注入時の表面電気伝導度を見積もると約50K以上の温度で金属伝導が観測された。今後スピン偏極を検出するために磁場依存性を測定したい。

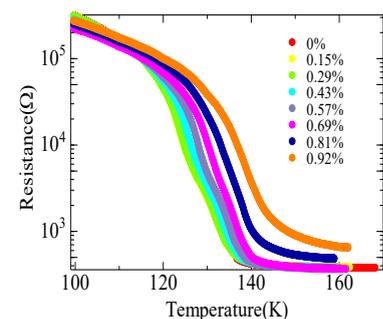


ゲート電圧と抵抗の関係

8 α -(BEDT-TTF)₂I₃に対する曲げひずみ効果のひずみ方向依存性

古積 歩

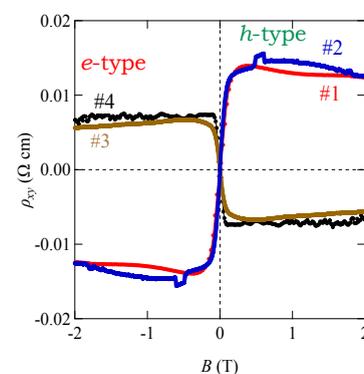
静水圧力下の α -(BEDT-TTF)₂I₃は初めて見出された代表的な有機ディラック電子系であり、電荷秩序相と隣接した電子間相互作用の強い系であることなどから注目を集めている。先行研究により、薄膜状試料の特定の結晶軸方向(*a*軸方向)に曲げ歪みを加えることで、試料を圧力媒体で覆うことなくディラック電子相が実現することが報告されている。本研究では、先行研究と異なる方向に歪みを加えたときの歪み効果について調べた。その結果、*b*軸方向に歪みを加えたときには絶縁化し、歪み効果に強い異方性があることがわかった。

*b*軸における抵抗の温度依存性

9 有機ディラック半金属における異常ホール効果

亀山 麟太郎

最近、高圧下にある α -(BEDT-TTF)₂I₃で極低温で時間反転対称性および空間反転対称性が破れた3次元ディラック半金属が実現していることが明らかになってきた。このような系の輸送特性には、ベリー曲率が重要な役割を担っている。本研究では、異常ホール効果の検出を目的に、1.7 GPaの高圧下・4.2 K以下の低温でこの系のホール効果を電子型と正孔型の2種類の試料で調べた。正孔型と電子型の両試料とも異常ホール効果の特徴を観測した。ホール抵抗はゼロ磁場近傍で階段状に変化し、磁場が強いところでプラトーを示すのである。量子抵抗 (h/e^2) 近傍でシートホール抵抗はプラトーを示すことがわかった。



0.5 Kにおける正孔型(#1, #2)と電子型(#3, #4)のホール抵抗率の磁場依存性。

宇宙物理学教室

1 降着円盤の表面温度と光度の関係を考慮したブラックホール-シャドウ

角田 侑己

2019 年に Event Horizon Telescope により銀河中心にあるブラックホールの影 (BH shadow) の直接撮像に成功した。BH shadow の観測からは BH の質量やスピンの情報を得られるが、そのためには数値シミュレーションを行い、理論的な BH shadow と観測結果の比較が必要である。そこで本研究では、先行研究の BH shadow の結果を再現するとともに、標準降着円盤がつくる BH-shadow の計算を行った。降着円盤の表面温度と半径、光度の関係から降着円盤の内縁に近いほど高温であり、内縁と外縁を 6M と 12M とすると約 1.6 倍の明るさになることが分かった。

2 非球対称性を考慮したダークマターハローの Splashback Radius のスタッキング解析

金子 じゅん

近年、ダークマターハローの物理的な半径として Splashback Radius が考えられている。先行研究では個々のハローに対して解析を行い、Splashback Radius の同定を試みていた。しかしハローによって密度分布のばらつきが大きく、同定が難しいという見解が示されていた。そこで本研究では、ハローの非球対称性を考慮した Splashback Radius の同定精度を高めるために、個々のハローの解析に加えてデータを重ね合わせるスタッキング解析を行った。10 個程度のハローの粒子分布に対して慣性モーメントテンソルを用いることで長軸方向と短軸方向を決定し、各軸長を揃えたデータをスタッキングして Splashback Radius を同定した。今回の結果から、ハローの軸比と Splashback Radius の関係性について考察する。

3 JWST による遠方銀河の観測データと標準宇宙論モデルとの整合性

清水 大河

James Webb Space Telescope (JWST) によって、これまで観測できなかった遠方銀河のデータが得られるようになった。観測データを解析した先行研究の中には、解析から得られた銀河の数密度が、標準宇宙論モデルでは説明困難であると指摘するものがある。本研究では、JWST の観測データと標準宇宙論モデルとの整合性を調べるため、大規模数値シミュレーションに基づくダークマターハローの質量関数を用いて銀河の数密度の上限を計算し、観測データとの比較を行った。両者の比較から、先行研究で指摘されていた矛盾は見られなかったが、近傍宇宙に比べて高い効率で星が形成される必要があることが分かった。

4 宇宙マイクロ波背景放射スペクトルの歪みに対する制限

関口 颯樹

観測されている宇宙マイクロ波背景放射のスペクトルは、高い精度でプランク分布に従う。ただし、観測の誤差よりも小さなずれが存在していた場合、それは、物質と光子の間の熱平衡状態が終了してから現在までのどこかで、プランク分布を歪ませるような現象（例えば光子に対するエネルギー注入など）が起こったことを意味する。そこで本研究では、宇宙マイクロ波背景放射スペクトルの時間進化を数値的に計算し、光子に対するエネルギー注入の時期と大きさに対して現状の観測データからの制限を導いた。結果として、例えば赤方偏移 $10^4 \lesssim z \lesssim 10^5$ の時期にエネルギー注入が起こった場合には、光子の温度変化に換算して約0.004%以下のエネルギー注入のみが許されることがわかった。

5 超新星爆発による爆風波が周囲の天体に与える影響

根岸 朱里

質量の大きい恒星は進化の最後に超新星爆発を起こし、周囲の環境に様々な影響を与える。その中でも本研究では爆風波による直接的な影響に焦点を置き、爆発を点源爆発とみなして、Sedov 段階における衝撃波面の速度と温度を、地球からの距離、爆発エネルギー、および星間ガスの密度の関数として求めた。ここで Sedov 段階とは 超新星爆発による衝撃波内部の圧力が星間ガスの圧力よりも十分に大きい条件が成り立つ断熱膨張段階を指し、自己相似的な厳密解が存在する。得られた解に基づき、超新星爆発による爆風波が与える影響を評価するため、太陽フレアを爆風波とみなした場合の影響と比較した。その結果、地球から 35 光年より遠い距離で起こる超新星爆発であれば太陽フレアより小さい速度、温度の衝撃波であるため、その影響はほとんどないことが分かった。実際に、太陽の次に近い 4.2 光年の距離にある恒星プロクシマケンタウリが超新星爆発を起こした場合について調べてみると、衝撃波の速度は太陽フレアの 20 倍、温度は 600 倍の影響があることがわかった。

6 ファイバー束の理論から見た電磁場

山中 聖斗

自然界の 4 つの相互作用は、古典的にはゲージ理論の枠組みで記述され、重力以外は量子化にも成功している。一方重力では、量子化を困難にする要因が古典論に由来するのかがはっきりしていない。そこで、ゲージ理論の数学であるファイバー束の理論を用いて一般相対論を記述し、古典論の範囲で前述の要因について探るという大きな目的のために、本研究では、ファイバー束についてまとめ、電磁場をファイバー束の理論として翻訳した。この観点では、ベクトルポテンシャル A_μ は接続係数としてスカラー場の存在するファイバー束上の微分を定めている。このファイバー束は ψ と $e^{i\theta(x)}\psi$ を同一視する構造(U(1)ゲージ不変性)を持つことで、 A_μ のゲージ不変性を実現している。また、マックスウェルテンソル $F_{\mu\nu}$ は A_μ に関するこのファイバー束の曲率である。

7 1次元のオイラー方程式を2次精度で計算するコードの開発

若林 佑哉

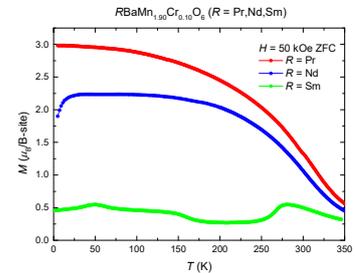
宇宙には流体に関わる現象が多く、オイラー方程式の計算が必要になる。オイラー方程式は所定の手順に従って独立した非線形の移流方程式に分解できるため、オイラー方程式の計算には非線形移流方程式の計算法が有効といえる。本研究では、非線形の移流方程式であるバーガース方程式を4次のルンゲクッタ法と空間2次精度のMUSCL内挿を用いたコードを開発した。コードの性能評価で精度の向上が確認できた。このコードから1次元オイラー方程式を計算するコードを開発し、衝撃波管問題の計算を行った結果、数値解が厳密解を再現することが確かめられた。

磁気物性学教室

1 Cr 置換が $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ の磁気特性が与える効果

佐藤 篤矢

ペロブスカイト Mn 酸化物 $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ ($R = \text{希土類}$) は室温で超巨大磁気抵抗 (CMR) 効果を示すことが期待される物質である。しかしながら、 $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ の電荷・軌道秩序絶縁体相が磁場に対して堅牢であるため、CMR 効果は生じない。先行研究では $\text{NdBaMn}_2\text{O}_6$ の Mn サイトの一部を Cr で置換することにより電荷・軌道絶縁体相から強磁性金属相への磁場誘起相転移が起こることが報告された。本研究では R サイトに Nd と近いイオン半径を持つ $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ ($R = \text{Pr, Sm}$) の Cr 置換が磁気特性に与える効果を調べた。Cr 置換することで $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ では $\text{NdBaMn}_2\text{O}_6$ と同様に磁場誘起相転移が見られたが、 $\text{SmBaMn}_2\text{O}_6$ の方ではそのような振る舞いは見られなかった。

2 A サイトの秩序度が $\text{NdBaMn}_2\text{O}_6$ の磁気特性に与える効果

濱井 徳晴

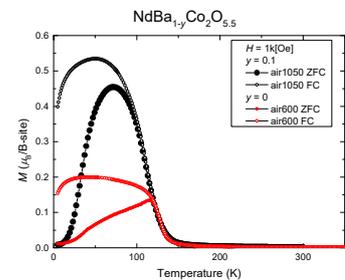
$R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ ($R = \text{希土類}$) は室温付近で電荷・軌道秩序相、強磁性金属相、A 型反強磁性相が多重臨界点を形成しているため室温超巨大磁気抵抗効果 (CMR 効果) の発現が期待される。多重臨界点付近の物性は R/Ba の規則構造の秩序度の影響を受けやすいので、本研究では多重臨界点付近にある $\text{NdBaMn}_2\text{O}_6$ の A サイトの秩序度を変化に伴う磁気特性の変化を調べた。その結果、試料作成の際の中間生成物の酸素量が異なると磁化が大きく変化する。この結果、中間状態の酸素量を変えることで秩序度が変わることがわかった。

図等
(自由に)

3 $\text{NdBaCo}_2\text{O}_{5+x}$ の Ba 欠損効果

本多 駿一

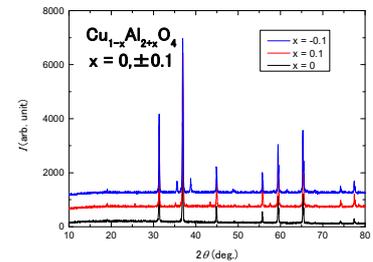
$R\text{BaCo}_2\text{O}_{5+x}$ ($R = \text{希土類}$) は A サイト秩序型ペロブスカイト構造を持っており、金属-絶縁体転移やスピン状態転移などの物性を示す。本研究では $\text{NdBaCo}_2\text{O}_{5+x}$ の Ba 欠損量の変化に伴う結晶構造や磁気特性の変化を X 線回折や磁化測定、ヨウ素滴定を行う事で調べた。先行研究の $\text{EuBaCo}_2\text{O}_{5+x}$ では Ba 欠損の限界量は 5% であることが報告されたが、本研究により $\text{NdBaCo}_2\text{O}_{5+x}$ では Ba 欠損限界は 10% になることがわかった。 $R = \text{Eu}$ の試料と比較して $R = \text{Nd}$ の Ba 欠損量の限界値が増加したのは、 Eu^{3+} に比べて Nd^{3+} のイオン半径が大きい事が影響していると考えられる。また、Ba 欠損や Ar 焼成を行う事で、大きな磁化の変化が見られた。



4 スピネル型酸化物 $\text{Cu}_{1-x}\text{Al}_{2+x}\text{O}_4$ の磁気特性

山下 雅弘

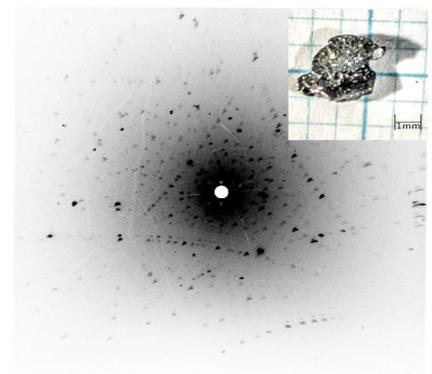
スピネル型酸化物 CuAl_2O_4 はヤーンテラー活性のイオン(Cu^{2+})を持っているにもかかわらず、立方晶構造を保っている。その原因については判明していないが Cu と Al の相互固有に関係がある可能性が指摘されている。また、 Cu^{2+} は強いスピン軌道相互作用のため、特殊な磁性イオン($J_{\text{eff}}=1/2$)を持つことを指摘されていることから注目されている。本研究では四面体サイトの Cu の占有率が結晶構造や磁性に与える効果についての研究を行った。 $-0.02 \leq x \leq 0.06$ の範囲で試料を作成することに成功した。また、 $x=-0.02$ の磁化測定を行ったが、構造転移は見られなかった。

図: $x \pm 0.1$ の X 線回折結果

5 トポロジカル半金属 $\text{Dy}_2\text{Zn}_{17}$ の単結晶育成

田口寛都

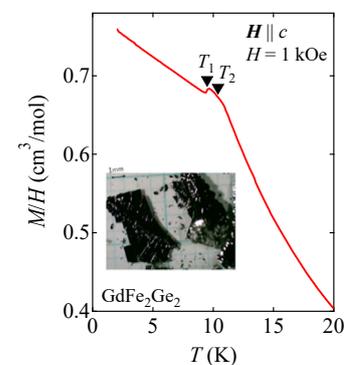
$\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ 型構造を持つ希土類金属化合物 $R_2\text{Zn}_{17}$ (R : 希土類元素) は、結晶構造の対称性に起因した非自明なトポロジーを有する電子バンド構造と磁性の相関によって磁気秩序を伏せ持つ系であり、非自明なトポロジーと磁性の相関によって生じる物理を解明していく舞台として有力な候補の一つである。本研究では低温で非単調な磁化の磁場依存性が報告され、複雑な磁気秩序が実現していると期待される $\text{Dy}_2\text{Zn}_{17}$ を対象とし、二元系相図に基づく単結晶育成を行った。その結果、真空封入下における金属フラックス法で育成された 3 mm 以上のサイズを持つ試料は、粉末 X 線回折パターン及びラウエ写真から、純良な単結晶試料である事が確かめられた。磁気輸送特性をはじめとする将来的な物性測定により磁性とトポロジーの相関を明らかにする。

図. $\text{Dy}_2\text{Zn}_{17}$ のラウエ写真
(インセット)育成した結晶

6 磁性トポロジカル半金属 $R\text{Fe}_2\text{Ge}_2$ ($R = \text{Gd}, \text{Dy}$) の単結晶育成

橋本凌太

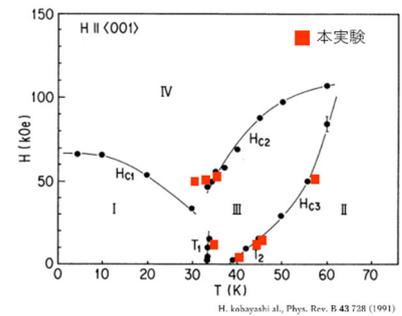
ThCr_2Si_2 型構造は三元系化合物がとる典型的な構造の一つであり、重い電子系、超伝導、量子臨界点の存在など多彩な物性を示す系として知られる。本研究で対象とする $R\text{Fe}_2\text{Ge}_2$ ($R = \text{希土類}$) も ThCr_2Si_2 型構造をとる金属間化合物であり、その結晶対称性に起因するトポロジカルに非自明な電子バンド構造と希土類元素が示す磁性を併せ持っている。この様な系において発現するトポロジカルに非自明な物性の探索のため、真空封入下金属フラックス法による単結晶育成を試みた。得られた 5 mm 程度を越える大型試料は、 $R = \text{Gd}$ に関しては粉末 X 線回折実験による構造及び磁化測定による磁性の観点から、 $R = \text{Dy}$ に関しては構造の観点からそれぞれ純良結晶であると評価する事ができ、今後の新奇物性の探索に資する成果が得られた。

Gd Fe_2Ge_2 の帯磁率温度依存性
(内挿図: Gd Fe_2Ge_2 結晶の写真)

7 層状磁性ワイル半金属 $DyMn_2X_2$ ($X=Si, Ge$) 及び $DyMnSi$ の合成

中山智哉

2次元電子系の特異な超伝導など、電子系の次元性が発現する量子物性に顕著な影響を与える事が知られている。電子系の次元性の制御方法としては、試料育成時に物理的に制御する方法やバルク状態から剥離する方法の他に、自然に合成される積層構造(自然超格子)に頼る方法が挙げられ、特に後者の方法による試料合成は清浄な電子系を実現可能であるという事から近年注目を集めている。本研究では、異なる積層構造を有する磁性トポロジカル半金属 $RMnX$ 及び RMn_2X_2 ($R = \text{希土類}, X = \text{Si, Ge}$) を対象に、電子系の次元性-トポロジー-磁性の相関に起因する新奇物性の発現と解明を目的とする研究を行った。真空封入下における金属フラックス法による結晶育成を試み、粉末 X 線回折実験及び磁化測定によって評価した結果、大型の $DyMn_2Ge_2$ 単結晶試料の育成に成功した。

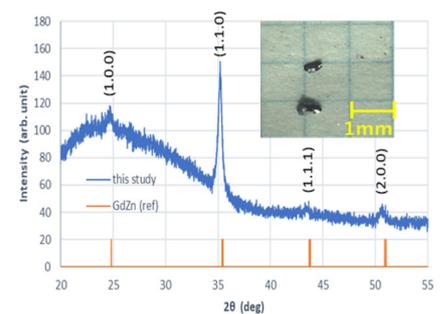


DyMn₂Ge₂の磁性相図の比較 (黒点: 文献値、赤点: 実験値)

8 3次元フラットバンド物質 RZn ($R = Ho, Gd, Nd$)の単結晶育成

吉野 剛志

エネルギーが波数に依存しないフラットバンド系では運動エネルギーがクエンチされるため、物性の発現に電子間の相互作用効果が本質的な役割を果たす。このような物理は *twisted bilayer graphene* をはじめとする2次元系で精力的に研究されているが、3次元系における実験的研究例は少なく、物質開発や3次元系特有の物理の解明が注目を集めている。本研究では、Fermi エネルギー近傍にフラットなバンド構造を持つことが理論的に示されている3次元系金属間化合物 RZn を対象に、フラットバンドの存在と、それに起因する電子相関と RZn の持つ磁性により発現する物理の観測、解明を最終的な目的として、その第一歩目となる単結晶試料の育成を試みた。二元系相図に基づき複数の方法で結晶育成を行った結果、 $R = Gd, Nd$ の物質については真空封入下における金属フラックス法によって単結晶を育成することに成功し、今後の相関物性の研究に繋がる成果が得られた。



GdZnの粉末X線回折ピーク (Inset: 得られたGdZn結晶写真)

9 磁化プラトーを有するトポロジカル半金属の輸送特性

山田詩音

非自明なトポロジーと磁性とを併せ持つ系においては、磁気秩序に伴う対称性の低下がトポロジカルな物性に与える効果についての理解は進んでいるものの、磁性とトポロジーの本質的な相関により創発する物性に関しては未解明である。本研究ではその相関を明らかにするため、フェルミ準位近傍にワイル点を有するとともに非自明な磁気状態をもつ $DyAgGe$ と $HoAgGe$ を対象とし、単結晶育成と磁場中における輸送係数の測定を行った。その結果、 $HoAgGe$ は磁性転移に伴い電気抵抗率 ρ_{xx} の増大とホール抵抗率 ρ_{yx} の傾きの変化を示す事が明らかになった。これらは、磁性転移近傍におけるスピン揺らぎや磁氣的ドメイン揺らぎの増大によって電子散乱が増大する事、及び磁気秩序毎に大きさの異なる交換分裂を持つ事に由来して磁性転移に伴う電子構造の変化を示す事に起因するものと考えられる。

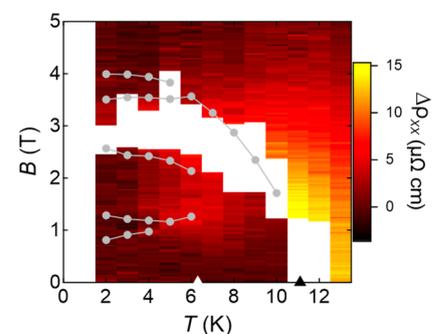


図. $HoAgGe$ の磁性転移に伴う電気抵抗率の増大 $\Delta\rho_{xx}$