

# 令和3年度近畿大学工学部物理学コース 卒業研究発表会

令和4年2月7日（月）9:30—16:15 於 31号館401、501、506、604教室

## プログラム

9:30-9:35 開会の辞：近藤先生 於 Zoom メインセッション（全員）

9:35-9:40 諸注意：井上 於 Zoom メインセッション（全員）

9:40-9:45 参加したいセッション (a-d) のブレイクアウトルーム (room1-4)、教室へ移動（全員）

---

### セッション a (room1) 401 教室 20 名

1. 高エネルギー天体物理学研究室（信川研：8名） 9:45-11:45 座長：石橋研  
休憩 75分 11:45-13:00
2. 一般相対論・宇宙論研究室（石橋研：6名） 13:00-14:30 座長：近藤研  
休憩 10分 14:30-14:40
3. 量子制御研究室（近藤研：6名） 14:40-16:10 座長：信川研

### セッション b (room2) 501 教室 19 名

1. ソフトマター物理学研究室（堂寺研：7名） 9:45-11:30 座長：西山研  
休憩 10分 11:30-11:40
2. 生命動態物理学研究室（西山研：6名） 11:40-13:10 座長：段下研  
休憩 75分 13:10-14:25
3. 量子多体物理学研究室（段下研：6名） 14:25-15:55 座長：堂寺研

### セッション c (room3) 506 教室 20 名

1. 生物物理学研究室（矢野研：8名） 9:45-11:45 座長：笠松研  
休憩 75分 11:45-13:00
2. 物性理論研究室（笠松研：7名） 13:00-14:45 座長：加藤研  
休憩 10分 14:45-14:55
3. 素粒子実験研究室（加藤研：5名） 14:55-16:10 座長：矢野研

### セッション d (room4) 604 教室 20 名

1. 宇宙論研究室（井上研：7名） 9:45-11:30 座長：大村研  
休憩 10分 11:30-11:40
2. 素粒子現象論研究室（大村研：6名） 11:40-13:10 座長：増井研  
休憩 75分 13:10-14:25
3. 固体電子物理研究室（増井研：7名） 14:25-16:10 座長：井上研

---

16:10-16:15 閉会の辞：井上

---

## Zoom 祝賀会 (18:30-19:30)

総評：三角先生  
各研究室談話  
閉会の辞：井上

## 題名・概要

### セッション a

## 高エネルギー天体物理学研究室

### a1 超新星残骸における低エネルギー宇宙線起源の中性鉄輝線の探査

低エネルギー宇宙線は太陽磁場の影響を受けるので太陽系内での直接観測は困難である。星間物質中の鉄原子が低エネルギー宇宙線によって電離されて放射する中性鉄輝線は、低エネルギー宇宙線の新たな観測方法である。私は X 線天文衛星すざくを用いて、4 つの超新星残骸で中性鉄輝線を探査した。G330.2+1.0 と G348.5+0.1 からは有意な中性鉄輝線放射は見つからなかったが、G304.6+0.1 と G346.6-0.2 からは、それぞれ  $3.25\sigma$ 、 $2.95\sigma$  の有意度で中性鉄輝線を検出した。特に、付随する分子雲が先行研究で詳細に観測されている G346.6-0.2 では、中性鉄輝線の分布は分子雲と部分的に一致していた。中性鉄輝線は X 線による電離でも放射されるが、輝線強度を説明できる明るい天体は周囲に存在しない。中性鉄輝線の起源として最も可能性が高いのは宇宙線による電離と考え、輝線強度から低エネルギー宇宙線のエネルギー密度を見積もった。

### a2 X 線天文衛星すざくによる超新星残骸 3C 400.2 のプラズマ状態の調査

超新星残骸では、衝撃波加熱により爆発噴出物と星間物質が高温プラズマとなり、X 線を放射する。通常のプラズマ進化では、電離過程が優勢な状態を経て、電離平衡状態となる。一方最近の観測で、再結合過程が優勢な状態の超新星残骸が見つかった。3C 400.2 も、先行研究によって再結合優勢プラズマの存在が指摘されている。しかし、測定されたプラズマの物理パラメータは、著者によって大きな相違がある (Broersen et al. 2015, MNRAS, 446, 3885; Ergin et al. 2017, ApJ, 842, 22)。その原因の 1 つとしてバックグラウンドの引き方が考えられる。本研究ではすざく衛星のデータを用いて、バックグラウンドを注意深く評価した上で、3C 400.2 のプラズマ状態を調査した。その結果、先行研究とは違い、3C 400.2 の高温プラズマは再結合優勢状態ではなく電離優勢状態で説明できた。

### a3 X 線天文衛星すざくによる超新星残骸 3C 396 からの鉄輝線の発見

超新星残骸 (SNR) 3C 396 は中央にパルサー風星雲 (PWN) がある複合型の SNR で、西側のシェル (衝撃波) は分子雲と相互作用している。本研究では、X 線天文衛星すざくを用いて鉄輝線を測定し、SNR の高温プラズマ由来と考えられる He 状鉄イオンからの鉄輝線を  $7.1\sigma$  の有意度で発見した。また SNR の高温プラズマは、先行研究では 1 温度の電離優勢プラズマモデルで説明されていたが、本研究では 2 温度で説明できることがわかった。それぞれ星間物質と爆発噴出物に由来すると考えられる。また、3C 396 を領域に分けて鉄輝線の分布を調査した結果、PWN を除いた中心部分に多く分布していることがわかった。恒星の中心で元素合成された鉄が、爆発時に超新星残骸の内向きに向かって進む衝撃波 (逆行衝撃波) によって加熱され、鉄輝線を放射していると考えられる。

### a4 X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 CCD 検出器における撮像モードごとの性能評価

我々は、2022 年度打ち上げ予定の X 線天文衛星 XRISM 搭載 CCD 検出器の開発を行っている。CCD 検出器は、4 枚の CCD 素子を  $2 \times 2$  に配置し、0.4-13 keV 帯域で撮像分光を行う。私は、筑波宇宙センターの地上試験で取得した衛星搭載品のデータを用いて、CCD 検出器の 2 つの撮像モード、すなわち、全領域を読み出す normal mode と 1/8 領域のみを高速で読み出す 1/8 window mode の性能を評価した。特に、エネルギー分解能と電荷転送効率を測定し、カウントマップやカウントレートが 2 つの撮像モードで矛盾がないか検討した。その結果、エネルギー分解能、電荷転送効率、カウントマップには、明らかな問題は見つからなかった。しかしカウントレートに関しては、1/8 window mode の方が normal mode より 2.4-4.5% 程度大きく分かっていた。

### a5 X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 CCD 素子における Goffset のシミュレーション

X 線 CCD を用いて天体の X 線スペクトルを得るには、CCD からの信号値 (波高値) をエネルギーに変換するエネルギー較正が必要であり、その較正精度は科学成果の信頼性に直結する。XRISM 用 X 線 CCD 素子では、1 ピクセルイベントに比べ、複数ピクセルにまたがったイベントの方が波高値が高くなる現象 (Goffset) があり、低エネルギー側ほど波高値の差は大きくなる。ノイズが Goffset に影響を与えているという仮説のもと、我々はシミュレーションを用いてノイズと Goffset の関係を調査した。その結果、ノイズが増えると Goffset も増えること、あるノイズの値での Goffset が実データを再現することを確認した。一方、ノイズが全くない場合でも Goffset が存在することが分かった。この場合の Goffset は、周囲のピクセルにまたがった波高値の取りこぼしに起因すると考えた。実際ノイズがない状態で、X 線入射ピクセルの周囲  $3 \times 3$  ピクセルの波高値を全て足し合わせると、Goffset が解消することを確認した。

### a6 次世代 X 線天文衛星用 SOI ピクセル検出器の実験システムの構築及び素子の不具合について

我々は、次世代 X 線天文衛星 FORCE (Focusing-On-Relativistic-universe-and-Cosmic-Evolution-satellite) の搭載に向けて X 線ピクセル検出器「XRPIX」の開発を行っている。「XRPIX」は、SOI (Silicon-on-insulator) 技術を用いて、X 線に感度を持つ Si センサ層・絶縁層・信号電荷を読み出す Si 回路層を一体化させた X 線 CMOS イメージセンサである。近畿大学で「XRPIX」の評価実験を行うため、我々は実験システムを構築した。本発表では、構築した評価システムの概要を報告する。また、評価実験中「XRPIX」に起きた不具合とその原因調査の結果及び対策案について発表する。

### a7 次世代 X 線天文衛星用 SOI ピクセル検出器の動作条件の最適化

我々は、次世代 X 線天文衛星用 SOI (Silicon-On-Insulator) ピクセル検出器である「XRPIX8」の性能評価システムを立ち上げた。「XRPIX8」では、X 線光子の入射で生成されるアナログ信号が前段アンプを経て、ADC (Analog-to-Digital-Converter) でデジタル信号へと変換される。前段アンプと ADC の出力オフセット電圧はそれぞれの可変抵抗を用いて調整する。出力オフセット電圧は

「XRPIX8」素子のエネルギー分解能に影響を与えることがわかったため、可変抵抗値を調整し、エネルギー分解能が最も良くなる条件を調査した。その結果、前段アンプと ADC の出力オフセット電圧値が共に 0.5 V 付近になったとき、エネルギー分解能が良くなることがわかった。

## a8 次世代 X 線天文衛星用 SOI ピクセル検出器におけるイベントパターンを用いた電子雲半径の推定

我々は次世代 X 線天文衛星用 SOI ピクセル検出器「XRPIX」の開発を行なっている。検出器に X 線が入射すると光電吸収によって電子の塊（電子雲）が生成される。電子雲の半径は検出器のエネルギー分解能に影響を与える重要な物理量である。電子雲半径を推定する手がかりとなるのが「イベントパターン」である。X 線の入射位置と電子雲の大きさによっては電子雲が複数のピクセルに跨る場合があり、そのピクセル数に応じて X 線イベントを区別する。これを「イベントパターン」と呼ぶ。電子雲が大きいかほど隣のピクセルに跨る確率は高くなるため、電子雲半径は各イベントパターンのカウント数の比（イベント比）に影響を与える。そこで私は X 線イベントを再現するシミュレーターを作成し、実験とシミュレーションそれぞれのイベント比を比較することで電子雲半径を推定した。本発表では、電子雲半径の温度依存性及びバックバイアス依存性について報告する。

## 一般相対論・宇宙論研究室

### a9 事象の地平面の面積の振る舞いでみるブラックホール第二法則

ブラックホールは熱力学的性質を有することが分かっている。熱力学第二法則あるいはエントロピー増大則に対応するのが「ホーキングの面積定理」であり、事象の地平面の面積は時間と共に増加することを示している。本発表では面積定理の証明を通して、事象の地平面の面積と熱学的エントロピーの類似性について考察する。その準備として、まず一般相対論における最も基本的なブラックホール時空であるシュヴァルツシルト時空について解説する。次に、光的測地線束に対する膨張率  $\theta$  とレイチャウデューリ方程式や共役点の概念を導入し、光的超曲面であるブラックホールの事象の地平面を生成する光的測地線束の振る舞いについて解説する。さらに、様々なエネルギー条件についても解説する。以上のことを用いて、ブラックホールの事象の地平面の膨張率  $\theta$  が負になることは許されず、したがって事象の地平面の面積は減少できないことを示す。

### a10 ブラックホールのトポロジー

我々はブラックホールといえば球体であると当然のように認識している。しかし、ブラックホールからは光すら放出されないため本来の姿を観測することには原理的困難がある。では我々はブラックホールの形を永遠に知ることは出来ないのだろうか。実は微分幾何学に視覚情報に頼らないで物体の形を知ることが出来る方法が存在する。それがガウス-ボンネの定理である。ガウス-ボンネの定理は二次元閉曲面の形（トポロジー）とその曲率を関係付ける定理であり、2次元閉曲面としてブラックホールの事象の地平面のトポロジーを決定することが出来る。本発表では回転のないブラックホール、定常回転ブラックホールそれぞれの事象の地平面の曲率の符号を、アインシュタイン方程式と物質のエネルギーの正値性から定め、そこからガウス-ボンネの定理を用いてブラックホールのトポロジーを決定する方法を解説する。

### a11 定常回転ブラックホールの事象の地平面と Killing ベクトル

時間に関する対称性である定常性は Killing ベクトル、すなわち時空の計量が変化しない方向を表すベクトルのうち時間的なものの存在によって定義される。このように一般相対論ではこの Killing ベクトルの概念を用いて時空の対称性や付随する物理量を記述する。本発表では Killing ベクトルの定義、Killing ベクトルを決定する Killing 方程式および Killing 対称性に付随した光的超曲面である Killing ホライズンについて解説する。Killing ホライズンでは Killing ベクトルが光的ベクトルとなり、ホライズンに垂直になることが分かる。そして静的ブラックホールの 1 つである Schwarzschild 解と定常回転ブラックホールである Kerr-Newman 解の事象の地平面が Killing ホライズンとなることを確認する。また定常回転ブラックホールは軸対称性を持つことを示す。最後に対称性を持つ時空におけるブラックホールの質量と角運動量を Killing ベクトルを用いて求める。

### a12 ブラックホールの表面重力と第 0 法則

星の表面の重力加速度を考えてみよう。通常、星の表面重力加速度は場所や条件によって異なる。しかし、ブラックホールの場合は、十分時間経過し動的変化のない状態となったブラックホールの表面重力は、事象の地平面のあらゆるところで一定となる性質がある。Hawking らの研究において定常ブラックホールの熱力学的性質が平衡熱力学系と対応することが分かっている。本発表では、定常ブラックホールの事象の地平面が、時空の等長対称性に付随した Killing ホライズンとなることに着目し、その表面重力が、Killing ホライズン上で一定となることを解説する。これは平衡熱力学系において温度が一定であるという熱力学第零法則に対応する。証明には、Killing ホライズンの分岐面を用いる方法と支配的エネルギー条件およびアインシュタイン方程式を用いる方法があり、本発表では、両方の証明を説明する。

## a13 ブラックホールと熱力学第一法則との関係

一般相対論の枠組みでは、ブラックホールの内部からは光を含めて何も放出されないため、絶対零度であると考えられてきた。しかし、近年の Hawking らの研究によって、ブラックホールは温度等の熱力学的性質を持つことが明らかになった。特に定常ブラックホールは平衡熱力学系に対応することが分かっている。そこで本発表では、平衡熱力学系の最も基本的な性質である熱力学第一法則に対応する、ブラックホール力学の第一法則について考察する。まず、定常回転真空ブラックホールを表すカー解において、熱力学第一法則との対応を示し、それが他の定常ブラックホールにおいても可能かどうかを考察する。平衡熱力学系の内部エネルギーに対応するのは、ブラックホールの全質量である。本発表では、アインシュタイン方程式の解の具体形によらず、漸近平坦時空の無限遠方での計量の振る舞いにより一般的に決定できる ADM 質量公式についても解説する。

## a14 ブラックホールの一意性及び Hawking 放射

ブラックホールには、熱力学の第零、一、二法則に対応するものがあり、ブラックホールも一つの熱力学系であるという推測がなされている。特に第一法則との対応は、平衡熱力学系が少数の熱力学量で決まると同様に、定常ブラックホールも少数のパラメーターで完全に特徴づけられることを示唆しており、それを裏付けるようにブラックホールの一意性が示されている。そして、ブラックホールも一つの熱力学系であるという推測を決定づけるものとして、ブラックホールの熱的放射 (ホーキング放射) が数学的に発見された。ホーキング放射は、ブラックホール時空上での量子場の振舞いにより生じる。ブラックホールの熱力学的性質から、量子重力への重要な洞察が得られるのではないかと期待されている。そこで、本発表では一意性に先鞭をつけた W.Israel の静的な一意性定理について簡潔に触れ、主としてブラックホールの温度を決定するホーキング放射の発生機構を解説する。

## 量子制御研究室

### a15 物体の運動の 3 次元データの取得

本研究では、Xbox360 というゲーム機の入力装置の一つである Kinect カメラを用いて物体の運動をとらえるシステムを構築する。Kinect カメラを Processing というプログラムで制御し、カメラから物体までの奥行きを濃淡に変換した距離画像を連続的に取得するシステムである。実際に、投げられたボールの空間座標の時間経過を示す運動データを取得することができた。物理学への応用として、このデータがニュートンの運動方程式と矛盾しないか検証する。また、このようなシステムを使えば、特殊な機械を要さずにバスケットボールやバドミントンのシャトルが描く軌道がわかりスポーツ観戦が楽しくなると期待される。

### a16 Deep-Neural-Network による楽譜自動生成システム

楽器初心者、経験者に関わらず採譜や楽譜がない曲の演奏は困難である。その理由は、ある音を単独に聴いたときその音の高さを音名 (いわゆるドレミ) をもちいて認識すること (絶対音感) が難しいからである。本研究では音楽関連のプログラムでよく使用される “magenta” という python のモジュールを用いて、ディープニューラルネットワークによる音程 (ピッチ) の認識を行った。このモジュールでは、学習にクラシックのピアノ演奏が用いられていた。そのピアノモデルを用いても、ベースなどピアノ以外の楽器について音程を認識することができるかを検証する。検証には midi ファーマットにしたがって作られた wav ファイルを用いた。

### a17 オフレゾナンス・エラーに耐性を持つ対称な複合量子ゲート

量子状態の制御 (量子制御) は工学や医療など様々な分野で行われている。近年注目されている量子コンピュータは、従来のコンピュータのビットを拡張した量子ビット (Qubit) を量子ゲートによって制御する。量子制御を行う上で問題となる系統的なエラーのうち Pulse Length Error (PLE) に関してはよく研究がなされていて、PLE に耐性を持つ複数の複合量子ゲートが見つかっている。だが、Off-Resonance Error (ORE) に耐性を持つ複合量子ゲートは CORPSE と呼ばれるものしか使われていない。中間発表では CORPSE 以外にも ORE に耐性を持つ複合量子ゲートをしらみつぶしに探索し、複数存在することを報告した。本発表では、1 Qubit を制御する、3 つの基本ゲートからなり、ORE に耐性を持つ対称な複合量子ゲートの系統的な構成法を示す。その上で、それらの複合量子ゲートの性能について評価する。

### a18 3D プリンターによる磁場の空間分布の測定

現在、医療では強い磁場を用いた Magnetic Resonance Imaging (MRI) 装置がよく使われている。この MRI 装置には、均一な磁場が必要である。この均一な磁場を得るためには、既存の磁場の空間分布を得る必要があるのは当然であろう。本研究では、3D プリンターのヘッドの移動機構を流用し、磁場測定器を空間スキャンするシステムを構築した。これによって、磁場の空間分布を測定することができる。また、磁場の空間分布を測定する際、ABS 樹脂を素材にして磁場測定器を固定するジグを作成するなど、3D プリンターの構造材 (特に鉄材) の影響を避けて磁場を測定する工夫を行った。発表では、作成したシステムの詳細とその制御プログラムを紹介した後に、例として測定した棒磁石の周囲の磁場分布を示す。

### a19 Si(111)-7 × 7 の表面構造

表面の構造の研究において有名な Si(111)-7 × 7 構造には、ダイヤモンド構造、dimer 構造、そして DAS 構造が含まれており、複雑でその全体をイメージすることは難しい。そこで、本研究では結晶構造の勉強の一環として、3D プリンターを用いて Si(111)-7 × 7 構造模型を作成することにした。模型は、原子を表す球と原子間結合を示す円柱を基本オブジェクトとしており、それを多数 (300 以上) 組み合わせた構造体である。本発表では、多数ある基本オブジェクトの位置を決定する Mathematica のプログラム、3D プリンターを用いた模型の作製方法や作製した模型の特徴を説明する。

## a20 ダヴィンチの橋の構造原理、解析および模型製作

大学卒業後、建築関係の専門学校に進学する。そこで、構造物の知識を深めたいと考え本研究を行った。ダヴィンチの橋は、レオナルド・ダヴィンチにより考案された、直方体状の部材を組み合わせ積み重ねる組積構造の典型的な例である。この橋は、接合する際に釘やボルトなどは一切使用せず、部材の組み合わせのみで自立するという興味深い特徴をもつ。そこで、本研究では橋を組み立てる際の手順や仕組みを理解し、各部材に作用する力のモーメント、せん断力、たわみの算定（構造解析）を行う。その解析的な議論に加えて、3D プリンターを使って作成した部材を用いて模型を作った。また、鉄資材を使用して実際に人が渡れるスケールでの橋の製作も行った。

## セッション b

### ソフトマター物理学研究室

#### b1 相転移の統計力学

固体物理学者の P. W. アンダーソン (1923-2020) が 1972 年の論文「More Is Different」で、「素粒子、原子、分子ばかりを見ていたのでは想像もつかない自然の豊かさや多様な物質相の存在は『相転移』があるため」と述べている。今回はその相転移について統計力学的に説明することを目標としている。第 1 章では、熱力学の相転移から説明する。第 2 章では、気相から液相の相転移について状態方程式や臨界点について説明する。第 3 章では、2 相分離について、混合の自由エネルギーと相分離のメカニズムを理解する。第 4 章では、2 次相転移について、イジング模型を用いて磁性的相転移について理解し、二元合金で規則的や不規則的な相転移について説明する。最後に、ミクロなメカニズムに立ち入らないで相転移を議論するランダウ理論についても紹介する。

#### b2 自己組織化

1959 年のファインマンの講演がナノテクノロジーの始まりとされ、毎年ナノテク分野の実験家と理論家にはファインマン賞が授与される。ナノテク分野において「自己組織化」とは、銀河の渦巻や雪の結晶のように、ひとりでに出来上がるというプロセスと概念であり、「自己組織化の科学」とは、物が自発的に組織化される現象の科学を意味する。自己組織化の理解には、あらゆる分野が関わっているため、自然が簡単な部品からどのように複雑なものを作り出すかを研究する生物分野、より大きく複雑な分子を作り出す化学分野、ナノスケールまで境界を広げて新しい製造方法を開発する工学分野、DNA を用いた計算方法を開発するコンピュータ科学分野、自己組織化をとらえるときに遭遇する問題を解くための理論モデルを研究する物理学や数学分野など、幅広い分野の研究者の努力が必要になる。本論文では自己組織化について理解されていることを学びまとめた。

#### b3 海洋の様々な波

東日本大震災における津波、最近ではトンガの噴火による津波など海洋に存在する波に関心が集まっている。本論文では、海洋に存在する様々な波について解説する。本論文で述べるのは次の 5 つの波である。まず、1 つ目、2 つ目は「浅水波」と「深水波」である。水深に比べて波長が十分に大きいときの波である浅水波と、十分に小さいときの深水波について、導出方法および構造について述べる。次に、3 つ目、4 つ目は「風波」と「うねり」である。海洋上に風が吹くと海面に凹凸ができる。この波を風波といい、風が止み海面の表面がなめらかで三角関数型の波となるとうねりという。最後に、5 つ目は「内部重力波」である。海面の波と同じく重力を復元力とするが、海面下の海水の密度変化のある層内で起こり、海面では目立たない波を内部重力波という。内部重力波として重要なケルビン・ヘルムホルツ不安定性による波動と、内部重力波の位相速度と群速度の奇妙な関係についても調べた。

#### b4 多孔質媒体における音の伝播の研究

空気は流体なので、多孔質媒体に存在する細孔内の壁と接触する部分で粘性による摩擦抵抗が起こる。それにより細孔内で空気の速度勾配が起き、音が減衰する。グラスウールのような多孔質媒体は、そのようにして防音材としての役割を果たす。一般的な音の波動方程式は減衰まで考えられていないが、本研究では減衰を考慮する。また、音場において波面に平行な面における平均音圧と体積速度の複素比を音響インピーダンスとよび、音波の反射率は、音響インピーダンスと入射角、屈折角から計算できる。2 つの媒質の音響インピーダンスの比が大きいほど反射率は大きくなる。本研究では、先に述べた粘性抵抗とインピーダンスの 2 つの要素から、多孔質媒体の音の伝播について考える。多孔質媒体の細孔の形状は複雑で計算が難しいので、厳密に計算できる単純な形状から計算を始め、より複雑な形状に適用可能な計算式を導出する。

#### b5 ジャイロイド構造の音響効果

近年、積層造形技術とよばれる 3D プリント技術の進歩によって、手作業や従来の機械での製作が困難であった複雑な構造や微小な物体などの製作が可能になった。本研究では、細胞、昆虫など生物、界面活性剤、高分子系などソフトマター分野で観察され、力学特性、熱伝導、光学、音響への応用が期待されている「ジャイロイド構造」とよばれる多孔質構造を 3D プリンターで製作し、音響管を用いた吸音・遮音効果の測定実験を行った。その結果、人間の可聴領域での音圧レベルの変動を観察できた。とりわけ、本研究の新規性はジャイロイド構造の持つ 2 つの独立な共連続細孔部に注目し、マテリアルの体積を一定にして細孔部の反転対称性を変化させる実験を実施したことにある。吸音材としての応用可能性を検討するため、周期構造の繰返し数と減衰の関係、減衰の周波数特性、反転対称性の違いによる効果を調べ、吸音率の高いモデルを発見することを目標とした。

#### b6 ジャイロイド二重膜での剛体球の規則的配置

ビリヤード球を並べると、1 つの球のまわりに 6 つの球が並ぶ。この六方構造は電子、原子から始まり、コロイド球や高分子が作る構造に至るまで、平面上での普遍的な規則構造である。一方、曲がった空間である正曲率曲面上では 20 面体ウイルスなどの規則的配置が知られているが、負曲率曲面での研究は少ない。本研究では、過去に負曲率をもつ周期的極小曲面であるジャイロイド曲面上

での規則的配置が研究され、ジャイロイド曲面上で単位胞あたり特定の剛体球（H数）で、エントロピーに誘起されたアルダー転移が存在することが分かっている。本研究では、ジャイロイド曲面を1枚から2枚（二重膜）に増やし、ジャイロイド二重膜での剛体球の規則的配置を研究した。まず、一膜のジャイロイドでキラルな配置がある48個で相転移が起こることを確認し、さらに二重膜で96個の粒子を用いてキラルな配置が共存する相転移が見られるか、モンテカルロシミュレーションを行った。

## b7 階段型ポテンシャルで相互作用するソフト粒子系におけるクラスター準結晶の自己組織化

柔らかい粒子は、重なり合って安定したクラスターを形成し、周期的、準周期的な結晶相に自己組織化することが知られており、クラスター結晶、またはクラスター準結晶とよばれている。本研究では、2つの長さスケールでエネルギーが下がる階段型斥力ポテンシャルで相互作用する2次元ソフト粒子系を研究した。Archer, Rucklidge, & Knobloch (PRL2013), Barkan, Engel, & Lifshitz (PRL2014)らの先行研究では液相やそれぞれの長さスケールで表される6回転対称及び12回転対称模様を形成することがわかっているが、今回の計算機実験ではPython用に作られたモジュールであるhoomd-blueを用いて、GPUおよびCUDAを活用したNVT分子動力学シミュレーションを行った。まず、先行研究で示された結晶相の再現を行い、さらに長さスケール、ポテンシャルの大きさなどを調整し、本研究室で発見された青銅比準結晶がこのポテンシャルによって自己組織化するか試みた。

## 生命動態物理学研究室

### b8 スマホカメラを用いた透過型分光器の作製と評価

本研究では、教育現場での活用などを念頭において、身の周りの道具を活用して分光器の作製を行った。分光器本体は、スリット、回折格子と箱から構成される。検出器としては、私達が日常的に用いるスマートフォンのカメラを利用した。このカメラには、画素数が多いために波長分解能が高く、感度が高いので光検出能の高さを期待できる。さらに、小型であるため自作の分光器に組み込みやすく、バッテリーを供えているので単独で使える利点がある。今回、自作した分光器を用いて、蛍光灯（白色・電球色）・白熱電球を光源として測定を行い、分光スペクトルなどを評価した。卒業研究発表会では新たに自作した透過型回折格子を用いた分光器について報告する。

### b9 光ピンセット法の開発

光ピンセットとは、レーザー光を回折限界集光まですることで、その焦点付近にナノメートルからマイクロメートルスケールの物体を捕捉できる光技術である。光ピンセットと光学顕微鏡を組み合わせると、顕微鏡下にある物体を観察しながら、非接触・非破壊で三次元的に捕捉し操作することができる。本研究では、高出力の近赤外レーザーを光源として利用し、レンズやミラーなどを適切な位置に配置して光ピンセットの光学系を構築した。さらに、顕微鏡にはグリーンレーザーを光源として落射照明による光学系をつくり、焦点面内にある幅広い視野を光励起し蛍光像を取得できるようにした。卒業研究発表会では、自ら開発してきた光学顕微鏡の詳細について報告する。

### b10 熱水噴出孔を模倣した温度差環境の構築と大腸菌の温度走性イメージング

太古の地球で生命が誕生したのは深海底の熱水噴出孔近くであると考えられている。熱水の噴出口は数百度にも達する一方、少し遠ざかると温度は急激に低下し数度となる。このように極端な温度差がある中で、原始生命体はどのようにして生き延びたのであろうか。本研究では、熱水噴出孔を模倣して温度差のある環境を顕微鏡下で再現することに取り組んだ。レーザー光を用いて局所的に加熱できる温度パルス顕微鏡を開発し、焦点面での温度分布をガラス基板に固定したビーズの蛍光強度変化から見積もった。本研究発表では、開発した実験系を用いて、大腸菌がどのように周囲の環境温度を知覚してよりよい場所へと移動し生き延びたのか、温度走性の実験結果について紹介する。

### b11 大腸菌遊泳運動の圧力応答

大腸菌は細胞の周りに生やしたべん毛繊維を船のスクリューのように回転させて水の中を泳いでいる。べん毛繊維を高速で回転させているのがべん毛モーターである。べん毛モーターは、細胞をとりまく物理条件や化学条件の影響を受けて、その運動能を大きく変える特徴がある。本研究では、高圧力顕微鏡を用いて、静水圧に対する大腸菌の遊泳運動能を調べる実験を行った。常圧力（0.1 MPa）では、細胞は29  $\mu$  m/sで水溶液中を泳いでいたが、圧力増加と共に遊泳速度を低下させ、80 MPaでは遊泳運動が完全に停止した。次に、減圧していき常圧力に戻したところ、菌体の遊泳速度は28  $\mu$  m/sとなった。したがって、大腸菌の遊泳運動は圧力に対して可逆的に応答する結果が得られた。

## b12 ブタ精子鞭毛運動の温度変調イメージング

咽喉から肺に至る気道の内壁には、繊毛と呼ばれる細い毛が生えている。この繊毛が動くことで、気道表面にある粘液が押し出され、気道に侵入したコロナウイルスなどが異物として体外へと排出されている。精子の尾部にある鞭毛は、繊毛とほぼ同じ構造であり、屈曲運動により精子に推進力を発生させている。この屈曲運動は鞭毛内にあるダイニンと微小管の滑り運動により生み出されており、細胞外からの物理刺激に応じて大きく変化することが知られている。本研究では、ヒトと同じ哺乳類であるブタの精子を用いて、鞭毛運動が温度変化によってどのように変化するかを調べる研究を行った。卒業研究発表会では、ブタ精子鞭毛の温度依存性について報告する。

## b13 麻酔薬の圧拮抗作用の実時間イメージング

今日、世界中の医療現場では全身麻酔薬が利用されている。全身麻酔薬には神経活動を鎮静化させる麻酔作用があるのだが、その作用機序は明らかにされていない。1950年、Johnsonらによって、静水圧をかけると麻酔薬の効果が弱められる圧拮抗作用が報告されたのだが、その詳細は依然として不明なままである。本研究では、最大5MPaまでの静水圧をかけられることができる大型圧カチャンバーを用いて、水棲動物の圧拮抗作用を再現し、その様子を実時間で観察する実験をおこなった。撮影にあたり、自作の暗室などを作製することで、実験生物の行動をより詳細に録画できるように改善できた。卒業研究報告会では、高圧力下で泳ぎだした水棲動物がどのような状態にあるか調べたので、あわせて報告する。

## 量子多体物理学研究室

### b14 イオントラップ系における局在フォノンの超流動現象の発現機構

トラップされたイオン集団を記述する Jaynes-Cummings-Hubbard (JCH) 模型は、各イオンの振動状態をフォノン、2つの内部状態を量子ビットとして扱う。この二つの自由度がレッドサイドバンド近くに同調したレーザーで結合されている。先行する理論研究において、JCH 模型で記述されるフォノンが超流動性を持つことが予言されている。本研究では、イオントラップ系のフォノンの超流動性の発現機構を明らかにするため、JCH 模型の BEC 状態の圧縮率を解析的に計算する。結果として、圧縮率がサイドバンド結合の強度に比例し、サイドバンド結合が実行的な粒子間相互作用も担うことを明示する。JCH 模型の量子ビットを相互作用するソフトコアボソンに置き換えた模型を解析して JCH 模型と比較することで、成分間の結合と実行的な粒子間相互作用の両方が超流動性の発現に必要であることを示す。

### b15 冷却原子 Bose 凝縮系の遠隔実験装置 Albert を用いた Bogoliubov 励起の異常トンネル効果の観測に向けて

希薄 Bose 気体の Bose-Einstein 凝縮体 (BEC) の素励起である Bogoliubov 励起がポテンシャル障壁をエネルギーゼロ極限において完全透過することが過去の理論研究から知られており、この現象は異常トンネル効果と呼ばれている。本研究では、ColdQuanta 社のクラウド型 BEC-Albert を用いて Bogoliubov 励起の異常トンネル効果を観測することを目的とする。本発表では、実験装置 Albert を操作する前段階として、空間 1 次元 Gross-Pitaevskii 方程式を数値シミュレーションすることで、異常トンネル効果の具体的な観測方法を探究する。Albert では原子数密度分布を測定できることを念頭に置き、この観測量と Bogoliubov 励起の透過確率を結びつける方法について議論する。

### b16 量子シミュレータの遠隔利用による Bose-Hubbard 模型の非平衡ダイナミクスの観測に向けて

光格子中冷却 Bose 気体を用いた Bose-Hubbard 模型の量子シミュレータは、利点として、長い緩和時間、孤立性、高いパラメータ制御性などを有するため、非平衡ダイナミクスの研究に適している。本研究では、京都大学量子光学研究室の量子シミュレータを遠隔で用いて、トラップポテンシャル中 1 次元冷却原子の非エルゴード的な振る舞いを観測することを目指す。本発表では、その研究背景と準備段階の数値計算を発表する。まず、熱平衡化と固有状態熱化仮説について説明し、冷却原子系で固有状態熱化仮説を破る振る舞いが現れることを紹介する。具体的には、相互作用の大きい場合に初期条件として  $|\psi\rangle = |\cdots 2020 \cdots\rangle$  を用意すると、その時間発展の非エルゴード的になる。最後に、実験をサポートする数値計算技術を身につけるために、行列積状態を用いてエンタングルメントエントロピーの時間発展を数値計算し、先行研究の結果と比較する。

### b17 光格子を用いて Maple leaf 格子中の Bose 粒子系を実現する方法の提案

三角光格子中の Bose 気体の実現以降、冷却原子気体で幾何学的フラストレーションを持つ量子系を量子シミュレーションする研究が目覚ましい発展を見せている。本研究では、量子多体系におけるフラストレーションの効果を研究する新たな舞台として Maple leaf 型の光格子中の冷却気体に注目し、周期の異なる三角光格子を 2 枚重ねることでこの系が実現できることを提案する。光格子ポテンシャル中の 1 粒子に関する Schrödinger 方程式の解を用いることで、光格子中の冷却気体を記述する Hubbard 型の模型を導出することができる。今回の発表では、Maple leaf 型の光格子に対して解析を実行する準備として、Dimerized lattice、三角格子、カゴメ格子に対して Hubbard 模型のホッピングパラメータを導出する。

## b18 符号反転した次近接相互作用を持つ Ising 模型で記述される Rydberg 原子集団における表面臨界現象

近年、Rydberg 原子系を用いた縦横磁場 Ising 模型の量子シミュレータが実現している一方で、現段階において最近接と次近接の相互作用が異符号である状況を作ることができていない。本研究では、Rydberg 状態をもう一つの Rydberg 状態と弱く重ね合わせることで最近接相互作用と異符号の次近接相互作用を持つ Ising 模型を実現できることを提案する。さらに、この新規な系において発現しうる興味深い現象の一例として表面臨界現象について議論する。1 次相転移近傍の反強磁性秩序変数の運動を記述する Ginzburg-Landau (GL) 方程式を導出し、微視的模型から得られる一様系の平均場自由エネルギーおよびスピン波の分散関係を GL 方程式のそれらと対応づけることで、GL 方程式に現れる係数を全て決定する。平均場近似による微視的模型の数値計算と比較することで、導出された GL 方程式に基づく解析計算の表面臨界現象に対する妥当性を検証する。

## b19 2次元量子 Ising 模型における相関伝搬速度の近似手法を用いた解析に向けて

近年、非平衡ダイナミクスの解析に優位性を持った Rydberg 原子系の量子シミュレーションが注目されている。この非平衡ダイナミクスの一つに量子 Ising 模型の相関の伝搬があり、伝搬速度の上限は 2 次元の場合厳密に解けない。本研究では、Rydberg 原子系を用いて量子シミュレーションできる量子 Ising 模型における相関伝搬のダイナミクスを調べる。具体的には、空間 2 次元系において、スピン波近似に量子補正を加えることで素励起の群速度を計算し、相関伝搬速度の目安を与えることを目的としている。本発表では、Rydberg 原子集団による反強磁性 Ising 模型を紹介する。加えて、解析的な手法で定量的な解析が可能な 1 次元系の相関伝搬に関する先行研究をおさらいする。具体的には、横磁場 Ising 模型における群速度の上限と磁気秩序側および常磁性側の異時刻 2 点相関の解析的表式を導出する。

## セッション c

### 生物物理学研究室

#### c1 移流拡散方程式のシミュレーション

もし水にインクを落とすと、インクは同心円状にジワーっと広がっていく。これを拡散とよぶ。またインクを落としたのが流れのある水面だった場合、インクは川下へ流れていく。これを移流と呼ぶ。これら 2 つを合わせて、同心円状に広がりながら流れていく一般的な流れを移流拡散方程式という。この移流拡散運動は煙やコーヒーとミルクの混ざりやエアコンの熱風、花粉の拡散やウイルスの拡散など様々なものがある Python で移流方程式、拡散方程式、2 つを合わせた移流拡散方程式を可視化することによって、ある観測位置を決め、流速、拡散係数の値を変えることによって、ある物理量が全体に行き渡る為どの係数が 1 番重要なのか、また最も適切な速度、拡散係数、温度などは何かを出していきたいと思う。

#### c2 Python によるポアズイユ流れのシミュレーション実験

日常生活には様々な流れが存在し、流れる物質の粘性、管径、入口出口の圧力差によって流れ方が変わってくる。流体分野におけるニュートンの第二法則に相当するナビエーストックス方程式の一般解が存在しているかどうかは未だ解明されておらず、数学の重要な 7 つの問題「ミレニアム懸賞問題」となっている。しかしながら、特殊な仮定をされたナビエーストックス方程式の厳密解は存在しており、円形の管の中をゆっくり流れる水などの流れ方に関する厳密解をポアズイユ流れという。本実験では物質ごとの粘性を考慮しながら管径と入口出口も圧力差を一定にしてストローで様々な食べ物を吸って飲む際のポアズイユ流れを観察しどの食べ物が飲みやすく飲みにくいかを視覚化することを目的とする。本実験では流れを可視化する際に画像処理をすることも視野に入れていたので、画像処理、計算、統計など物理学を行う上で他の言語より長けたライブラリーを持つ Python を使って実験を行った。

#### c3 マランゴニ対流による表面張力の自発振動の振幅と膜弾性率の関係性

マランゴニ対流とは表面張力の差によって発生する対流のことである。水中に界面活性剤の液滴を作ると、マランゴニ対流が周期的に発生する。それにより、表面張力が自発的に振動する現象が発生する。2019 年度の卒業研究では、水面にリン脂質である DPPC の単分子膜を展開しマランゴニ対流を発生させた。その結果、表面張力の自発振動の振幅が膜弾性率の増加に伴い大きくなることを発見した。今回の実験では、DPPC とコレステロールの混合膜を水面に展開しマランゴニ対流による表面張力の自発振動を観察した。コレステロールには膜の硬さを変化させる働きがあるため、DPPC とコレステロールを混ぜると膜弾性率が変化する。今回の研究では、膜弾性率の違いが表面張力の自発振動の振幅にどのような影響を与えるかについて考察していく。

#### c4 フーリエ赤外分光計 (FT-IR) を用いたセラミドを構成するラメラ構造の水分量測定

皮膚の角質内部に存在する細胞間脂質の主成分となるセラミドは、親水成分と親油成分で構成され、欠けることなくきれいに整列することで、バリア機能・水分保持機能を発揮している。この整列した状態のことをラメラ構造と呼ぶ。肌が荒れる原因の一つとして、このラメラ構造の水分量の減少が挙げられている。FT-IR 法では、赤外線照射し、吸光度を調べることによって中に含まれる物質の同定や、含有量の測定ができる。これを用いて、角層に含まれる水分量を測定する。また、FT-IR 法では、角層水分量だけでなく角層細胞間脂質の規則性や量的な検討、また結晶構造についても情報が得られる。本研究では、皮膚に水分が浸透する過程を FT-IR 法で測定し、水分の浸透に伴うラメラ構造の変化について考察した。

#### c5 蛍光 X 線による物質の測定

未知試料を調べる際にあたって、物体に触れずに測定する方法がある。その中でも今回実験していくのが X 線を使用した蛍光 X 線による測定である。元素にはそれぞれ特有の X 線を照射することによって原子の内郭の電子が励起され、外殻の電子が遷移する際に放



出されるそれぞれの物質特有の X 線がある。その特性 X 線を測定することによってその物体を構成する元素を特定する方法を蛍光 X 線測定という。蛍光 X 線の励起光源は今回 Cs137 を使用し、横軸単位をエネルギーに変換するエネルギー校正から始め、それをもとに身近にある金属、未知試料を測定していく。本発表ではこの測定原理を説明し、測定結果から透過測定と反射測定でのメリットデメリットなどを踏まえて検証していきたいと思う。

## c6 相対湿度の分布を伴う大気の熱平衡

近年問題になっている地球温暖化の主な原因は、大気中の二酸化炭素濃度の上昇であるというのが世間一般に広く知られている事であるが、実は水蒸気が最も温室効果がある。よって、地球温暖化について議論する上で大気中の水蒸気量、つまり湿度は必要不可欠である。真鍋淑郎氏の過去の研究では、平衡温度の計算に絶対湿度の鉛直分布を使用しているが、今回ノーベル物理学賞を受賞した真鍋氏の論文では、実際の大気の湿度は気温に大きく依存するため、相対湿度で考えるべきであると述べられ、それに基づいて計算がなされている。本研究では、二酸化炭素濃度の上昇に伴う気温の変化と、相対湿度の関係がもたらす結果について研究し、現在の気象データを用いて実際に計算を行う。

## c7 生分解性プラスチックの分解過程における構造解析

近年、プラスチックによる環境への被害が問題となっている。これはプラスチックの特徴である自然には分解されないというのが原因である。そこで重要視されてきたのが生分解性プラスチックというものである。生分解性プラスチックとは、自然界に存在する微生物の働きによって水と二酸化炭素に分解されるプラスチックのことである。生分解性プラスチックには様々な種類が存在するが、本研究ではその中でも牛乳に多く含まれているカゼインというタンパク質を主成分としたプラスチックを用いる。本研究では自作したカゼインプラスチックを土壌に埋め、経過期間 30 日目までに分解されていく過程において、分子同士の結合の変化を赤外分光法を用いて得た赤外吸収スペクトルから解析し、どのように構造が変化し自然界に還っていくのかを考察する。

## c8 赤外分光法による卵白の加熱及びタンパク質分解酵素による構造変化測定

体づくりに必要とされるタンパク質。食物からより効率よくタンパク質を吸収することができれば、筋肉を発達させる効率も上昇する。タンパク質は体内で消化されたのちに吸収されるので食物をより分解されやすい状態にすることでより早く吸収できる。つまり、分解の度合いを測定することにより吸収率がわかる。本実験では、食物に含まれるタンパク質の代表例として卵白に含まれるアルブミンに着目して測定を行った。どのような加熱温度で調理すれば卵を調理すれば良いか知るため、ゆで卵を温度別で作成し、そのゆで卵の卵白にタンパク質分解酵素を作用させたものの構造の変化を 1 時間ごとに赤外分光法により観察する。そこから最もタンパク質が分解されやすい温度のものを見つけることにより体内に吸収しやすい卵のタンパク質の処理温度を決定する。

## 物性理論研究室

### c9 機械学習を用いたイジング模型の相構造の研究

本研究では、2次元正方イジング模型を python で作成し、機械学習を用いてスピンの振る舞いを学習させることで相転移を見つける。それを応用して、そこから模型を2次元反強磁性三角格子のイジング模型に拡張した。しかし、反強磁性相互作用の2次元三角格子はフラストレーションが生じてしまう模型であるため、基底状態が決まらず有限温度では相転移が存在しないことが知られている。しかし、低温領域に比熱のピークが存在することが知られており、そのピークの高温側と低温側でスピンの相関関数を計算することで、相の性質を明らかにする。また、比熱のピークの前後でのスピンの振る舞いを機械学習させることによって相の分類が可能であるかを調べる。

### c10 2成分 Bose-Einstein 凝縮体中の渦糸における Kelvin 波について

Bose-Einstein 凝縮 (BEC) とは、1925 年に Bose と Einstein が予言した現象であり、ある転移温度以下で巨視的な数の Bose 粒子が単一の量子状態に凝縮する現象のことである。Bose-Einstein 凝縮を起こした量子凝縮系では、量子渦と呼ばれる位相欠陥が存在する。1本の量子渦の渦糸上に励起された Kelvin 波は、沢山の量子渦が絡み合った量子乱流が減衰するメカニズムと関連することが知られている。しかし、2成分 BEC では異成分間の相互作用が存在し、それが Kelvin 波の性質にどのような影響を与え出すかは自明ではない問題である。本研究では、異成分の原子間相互作用の強さを変えながら 2成分 BEC の Kelvin 波の分散関係を導出し、1成分 BEC の Kelvin 波の分散関係と比較することにより、2成分 BEC の Kelvin 波特有の性質を考察することを目的とする。

### c11 2成分ボースアインシュタイン凝縮体で生成される massive-vortex の運動

2成分ボースアインシュタイン凝縮体で、回転を持った成分が作る渦芯をもう一つの回転を持たない成分が埋めてできる massive-vortex の運動を調べた。そのために先行研究から、円筒容器中の回転を持つ単一成分のボースアインシュタイン凝縮体では渦芯が円筒の中心にあるときにエネルギー的に安定であり、中心から離れた場所に位置する渦は実時間発展で自身も回転しながら凝縮体密度の中心を原点として周期運動をすることを紹介する。そのあと massive-vortex の渦芯を埋める成分の粒子数や、回転を持つ成分の渦芯の位置を変えたときの周期や軌道を 2成分 Gross-Pitaevskii 方程式の数値計算を用いて調べたのでその結果をグラフで紹介する。

### c12 1次元フェルミ超流動体におけるダークソリトンのシミュレーション

超流動フェルミガス中では秩序変数が有限になればソリトンや渦のような位相欠陥が表れることが知られている。ソリトンは密度が 0 になるような点が存在するソリトンはダークソリトンと呼ばれている。卒業研究では、冷却原子フェルミ気体のダークソリトンの問題を考える。まず一様空間で第二量子化された BCS 波動関数からギャップ関数  $\Delta$ 、粒子数密度が従う方程式を導き出し、 $\Delta$  と化学ポテンシャル  $\mu$  の BCS-BEC クロスオーバー領域の振る舞いを再現した。次に 1次元空間を考え、非一様形に適合されたボゴリウボフ-デ・ジェンヌ方程式を解くことで同様に  $\Delta$ 、 $\mu$  の BCS-BEC クロスオーバー領域の振る舞いを再現し比較した。また、先行研究

で示された 3 次元における BCS-BEC クロスオーバーに沿った超流動フェルミガス中のソリトンの構造を 1 次元空間で考え、1 次元フェルミ超流動体に存在するダークソリトンを先行研究と比較し議論した。

### c13 回転するフェルミオンの超流動体における量子渦格子の研究

超流動とは、低温で流体が他の物体と接触しているにもかかわらず、摩擦なしに流れる現象である。1938 年に Kapitza たちによって液体ヘリウム  $^4\text{He}$  の超流動が発見され、そのあとに様々な研究が進んだ。冷却原子気体における超流動の研究では、ボーズ粒子系とフェルミ粒子系の両方で量子渦が実験的に観測された。回転する冷却原子気体中の量子渦は、超流動を記述する巨視的な波動関数が存在することの直接的な結果であるため、超流動の決定的な証拠となる。フェルミ超流動体の流体の運動を記述する理論的な定式化は確立していない。本研究では、フェルミオン超流体に適用した非線形シュレーディンガー方程式を用いた数値的な計算で量子渦格子を再現し、実際に行われた実験で観測された量子渦格子を比較する。そして、この理論の定式化がフェルミオンの超流体に対するモデル理論として妥当かを検証する

### c14 BCS-BEC クロスオーバー領域のフェルミ超流動体における渦の生成と臨界速度

本研究では BEC-BCS クロスオーバー領域の冷却原子気体フェルミ超流動体における渦の生成と臨界速度の観測と考察を目的とする。超流動現象には流れの安定性・不安定性という問題があり、臨界速度が存在する。ある臨界速度以上で流れると超流動体は素励起を放出し、流れは減衰する。この臨界速度を数値実験から観測する。まず、フェルミ超流動体における超流動臨界速度の測定実験の先行研究を紹介したうえで、本研究で行った数値計算について説明する。本研究ではフェルミ粒子系で応用できるようにした非線形シュレーディンガー方程式を使用した。この方程式を用いてフェルミ超流動体内に物体ポテンシャルを挿入し、超流動の中心に沿って一定の速度で動かす計算を行う。その間に生成された渦を観測する。この応用した方程式がどの程度測定実験の再現ができ、数値計算に活用できるかも検討する。

### c15 2 次元 XY 模型の相転移

物質の性質が急激な変化をする相転移は巨視的な系に現れる熱力学現象であり、その発生機構は系の微視的な性質と深く結びついている。その相転移を研究する統計力学の方法論として平均場近似やマルコフ連鎖モンテカルロ法がよく用いられる。2 次元 XY 模型は 2 次元 Ising 模型とは違って有限温度で長距離秩序を持たず、通常の相転移をしない。しかし、この系では長距離秩序を伴わない特殊な相転移を起こすことが知られている。本研究では、2 次元 XY 模型で起こる Kosterlitz-Thouless 転移について、実際にモンテカルロ法を用いて解析し、高温側での相関と低温側での相関を見ることによってその転移を確かめることを目的とする。

## 素粒子実験研究室

### c16 Python による確率分野の電子教材と授業計画の作成

「同様に確からしい」や「確率がどのようなものか」など、中学数学の「確率」分野は抽象的でイメージしにくい。そこでその分野の初回の授業で使える、「試行回数が増えるほどその事象の相対度数が確率に近づいていく」ということを気づかせることを目的とする。電子教材の機能としては、各事象に任意の確率を入力し、試行回数を決めると画面にヒストグラムが表示され、その下には出力回数と相対度数が数値として出力される。グラフで視覚的に・数値で絶対的に考察できることや、この電子教材と別に作成した学習プリントを併用することで、より考察を深めることができ、またクラス全体に個人の意見を共有することもできる電子教材を Python で作成した。この教材を活用することで今後の「確率」分野の学習の促進を図っていきたいと考える。

### c17 GEM モデルを用いた電子増幅率における絶縁体の厚さと孔径、電圧の 3 つの関係

GEM(Gas Electron Multiplier) とは、絶縁体を銅箔で挟み無数の穴をあけた電子ガス増幅機構で、銅箔の両面に電位差を与えることによって電場が発生し、その孔内に電子が通ることで電子の増幅を可能とした。当研究では GEM のモデルを作成して電子の増幅する過程をシミュレーションで再現した。そのために GEM のモデリングを行う Gmsh、そのモデルに電場構造を与える Elmer、電場を与えたモデルを使って電子の振る舞いのシミュレーションする Garfield++ の 3 つのソフトウェアを使用した。絶縁体の厚さや孔径、与える電圧を変えることによって電子の増幅率の変化を調べることが目標とした。結果 GEM モデル間の電場や絶縁体の厚さは大きく、孔径は  $55 \sim 65 \mu\text{m}$  程度にした場合増幅率は高く安定した値を取り、電場と絶縁体の厚さが小さく、孔径が大きければ増幅率も低くなることが分かった。

## c18 Arduino を用いた部屋の照明制御装置の製作

本研究では、測定と制御のシステム開発を理解するために、身近な要素を測定し制御することにした。今回は Arduino を用いて部屋の照明の制御を行った。制御装置作成には準備が必要で、まず初めに以下の二つのことを行った。一つ目に、CDS(光)センサーを用いて部屋の明るさ(光度)を測定し、部屋の明暗となる数値を定めた。二つ目に赤外線受信モジュールを利用し、家庭用リモコンから発せられる赤外線信号の解析を行った。これらのデータを得たのちに制御装置の作成を行った。制御装置の仕組みは、CDS(光)センサーで部屋の光度を測定し、先ほど設定した光センサーの明暗となる値に応じて、赤外線 L E D から部屋の照明に向かって ON/OFF 信号に相当する赤外線信号を発信させる。これらの手順で部屋の照明制御装置を作成した。

## c19 Arduino を用いた火力発電機の原理を利用した発電機の作成

本研究では、測定と制御のシステムを理解するために、興味のある発電のメカニズムを模したガスコンロを用いた火力発電機の原理を用いた発電機を作成した。本研究の発電機は Arduino とガスコンロと光センサーを用いて作成した。Arduino を用いガスコンロの火力と沸騰させる水容量を制御することで水蒸気の発生させる量を制御する。発生した水蒸気で回転したプロペラの回転数を測定する。プロペラの回転数の測定を行うためには、Arduino と光センサーを用いてプロペラが作る影を光センサーの上を何回通過したか測定し、それを回転数とする。また、本研究の火力発電機を模倣したシステムの発電機の発電量はモーター発電の原理に基づき、プロペラの回転数より発電量を計算する。このシステムにより、火力発電機の原理を用いた発電機を作成した。

## c20 Python を用いた中学物理の仕事とエネルギーの単元における電子教材と学習指導案

中学校理科の「位置エネルギーが小球の高さや質量に比例する」ということを、Python を用いた電子教材で利用して生徒が理解することを目的とする。中学校理科の物理分野の中でも、「仕事とエネルギー」の単元では、物体のもつエネルギーの大きさやエネルギーの変化する様子を頭の中でイメージしながら考えることは抽象的で理解が難しいと感じる生徒が多いと考える。この単元を学ぶにあたって、電子教材を使用し、物体のもつエネルギーの大きさやエネルギーの変化する様子を視覚的に捉えておくことで、この先の「エネルギーの移り変わり」の単元の理解につながると考える。そのため、実験した動画やグラフによって可視化することで、生徒が視覚的に理解できる Python の電子教材を作成した。この電子教材を用いた授業の学習指導案を作成した。

## セッション d

### 宇宙論研究室

#### d1 天文学チャットボットの開発

普通の生活で天文学について触れる機会が少ない。そこで多数の学生がコミュニケーションツールとして使われているスマートフォンと研究室のコミュニケーションツールとして使われている Slack を活用し、天文学の知識を手軽にインプットできるシステムをチャットボットで開発しようと考えた。本研究では python を用いて人工無能型のチャットボットと Dialogflow (Google 社が提供している AI エンジン) を用いて人工知能型のチャットボットを開発した。本発表ではチャットボットの種類、API、python を用いたチャットボットの開発手順、Dialogflow の主な機能、Dialogflow を用いたチャットボットの開発手順について報告する。

#### d2 自然言語処理

自然言語処理の目標は人の話す言葉をコンピュータに理解させ、役に立つことを行わせることである。コンピュータに単語の意味を理解させる手法にシソーラス、カウントベース、推論ベースの3つがある。シソーラスは、同じ意味の単語や意味の似た単語が同じグループに分類されている。細かいニュアンスまで表現できないなどの理由から、カウントベースや推論ベースなどの大量のテキストデータから自動的に単語の意味を抽出する手法に改善された。カウントベースの場合、次元削除を行うが、より大規模なテキストデータだと次元削除が不可能になってくるため、推論ベースへと改善された。本発表では、ニューラルネットワークに自然言語処理を用いた推論ベース (word2vec) について報告する。

#### d3 畳み込みニューラルネットワークによる画像の識別

ニューラルネットワークは、訓練データから得られた損失関数を減らすため、重みパラメータの勾配を求め、その勾配方向にパラメータを更新することを繰り返すことで学習を行う。この過程を効率よく行うため、誤差逆伝播法など様々な手法が考案されている。本発表では、ニューラルネットワークの仕組みと学習の基礎について説明し、誤差逆伝播法によるニューラルネットワークの学習の手法や、学習に関するテクニックについて説明する。また、近年画像認識のほとんどの場面で使われている学習の手法である畳み込みニューラルネットワークについて説明し、それを用いて小松菜とほうれん草の画像に対する学習をしたニューラルネットワークの認識および識別結果を報告する。

#### d4 位置天文学に関する 3DCG の作成

位置観測データから天体の運動について研究を行う「位置天文学」は天文学の基礎となる分野である。位置天文学では、宇宙を天球と呼ばれる仮想的な球体に近似し、天球面に対して用途に応じた天球座標系をとり、天体の位置を定めるが、正確な天体の運動を導くためには、天球座標系の取り扱いに加えて、他の天体からの影響や観測天体、地球自身の運動による座標値の変化など複数の要素に分解して理解する必要がある。この卒業研究では数種類の天球座標系、歳差と章動と呼ばれる月と太陽からの引力に起因する地球自転軸の回転運動についての研究を行い、オープンソースのフリーウェアである Blender を用いて作成した 3DCG を活用することで、視覚的な情報として直観的な理解が得られるような資料の制作を目指した。

## d5 銀河による重力レンズとシミュレーション

一般相対論では重力を時空の歪みとして表している。光もその影響を受け、星や銀河などの質量の大きな天体の近くを通る光は、曲がって進むように見える。天体の質量が円対称に分布している場合は円弧に見え、アインシュタインリングと呼ばれる。銀河のように楕円状に質量が分布しているとき、光源は2つもしくは4つに分かれて見える。これら多重像を用いるとレンズの役割をしている天体の質量分布を推測出来る。今回、質量が楕円状に分布している SIE モデルを用いて、4 重像を持つ重力レンズクェーサー SDSS0924+0219 と WFI2033-4723 のフィッティングを行った。モデルフィッティングは重力レンズのシミュレーションなどを行うことが出来る Python のパッケージ ‘Lenstronomy’ を用いた。本発表では、得られたモデルについて説明する。

## d6 超大質量ブラックホール連星を含む SIE モデルの重力レンズ現象

重力レンズ現象を引き起こす銀河内の質量が楕円対称に分布し、中心部で密度が発散している重力レンズモデルのことを SIE (特異等温楕円体) モデルという。本研究では SIE モデルにおける像の個数や形、SIE モデルの重力レンズ天体に超大質量ブラックホールが存在するという特別な場合における重力レンズ現象について解析を行う。超大質量ブラックホールとは、ブラックホールの中でも質量が太陽質量の 100 万倍以上のブラックホールのことである。本発表では SIE モデルにおいてレンズ方程式から考えられる点光源の像の個数に関する解析結果について説明する。また SIE モデルの重力レンズ天体に超大質量ブラックホールを入れた場合の点光源の像の個数と形のシミュレーションを演示し、その解析結果についても説明する。

## d7 MG0414+0534 近傍の暗黒矮小銀河のサブミリ波放射

MG0414+0534 はクェーサーの光が重力レンズ効果により、4 つの像として観測されている天体である。この天体を ALMA 望遠鏡を使いサブミリ波で観測し (Cycle2)、そのデータを解析した結果、MG0414+0534 の近傍に 0.3mJy 程度の暗黒矮小銀河の冷たい塵が起源と思われる淡い放射を確認した (Inoue et al., '17)。この放射が本当に暗黒矮小銀河のものであれば、暗黒矮小銀河の微弱な電波をサブミリ波で観測するという手法が有効であることを確認できる。そうすれば今後、行方不明の暗黒矮小銀河の発見が進み、その正体の解明に役立つことが期待される。しかし、その後の解析ではそのような放射は確認できず、この放射がノイズである可能性もでてきた (H.R.Stacey et al., '18)。本研究ではこの放射が存在するのか確かめるために Cycle2 だけでなく Cycle4 のデータも加えて画像解析を行った。本発表では解析結果について説明する。

## 素粒子現象論研究室

### d8 場の量子論と標準模型

物質の最小単位は素粒子である。原子および原子核は最小単位でなく、さらにミクロな構造があることがわかっている。素粒子の世界は、場の量子論に基づき構築された標準模型によって記述されている。素粒子を理解するには場の量子論を理解することが必要不可欠である。そこで本研究は場の量子論に焦点を当て、さまざまな場において作用積分や量子化を考えることでその場の性質や特徴について数式を用いて研究した。さらにディラック場においてディラック方程式を導出し、 $\gamma$  行列を用いてカイラルスピノルはスピン右巻きもしくは左巻き状態であることを議論した。また、自由場だけではなく相互作用が入った場合も考えるために、ゲージ対称性をラグランジアンに導入し、標準模型を構築するための対称性について研究した。

### d9 量子色力学における SU(3) 対称性と漸近的自由性について

クォークを結びつけ複合粒子を構成する強い相互作用は、グルーオンの媒介によって生じる。クォークとグルーオンは色荷とよばれる物理量を持ち、強い相互作用は色の状態で振る舞いを表現する量子色力学によって記述される。今回の卒業研究では量子色力学をテーマに、SU(3) ゲージ対称性と漸近的自由性を中心に理論研究を行った。初めにクォークの色の状態からクォークの閉じ込めなどの量子色力学の概観について議論する。さらにゲージ原理を SU(3) ゲージ理論に拡張することで、強い相互作用のラグランジアンを構築した。またクォークの距離が近ければ近いほど結合が弱くなる漸近的自由性は、量子色力学特有の性質である。粒子間の結合について他の素粒子理論と定量的な比較を行い、量子色力学の特異性に迫る。

### d10 対称性の自発的破れとゲージボソンの質量

2012 年に CERN の LHC 実験でヒッグス粒子が観測された。この粒子は 1964 年にヒッグスによって提唱された理論によって予言される。この理論はヒッグス機構と呼ばれる。ヒッグス機構は、スカラー場を導入し、系がある基底状態を選び、ゲージ対称性が自発的に破れることでゲージボソンが質量を獲得し、質量をもつスカラー粒子がでてくることを説明した。この卒業論文ではヒッグス機構について書いた。最初に、大域的ゲージ対称性をもつラグランジアンについて議論する。ここで、系がある基底状態を選び、大域的ゲージ対称性を自発的に破ることで、質量をもつスカラー粒子と質量ゼロのゴールドストーンボソンがでてくるのが分かる。次に局所的ゲージ対称性をもつラグランジアンについて議論する。ここで、導入されたスカラー場とゲージ場が相互作用することでゲージボソンが質量を獲得することが分かる。

### d11 暗黒物質とその存在証拠

この卒業論文では卒業ゼミナールで扱ったものを中心にまとめていく。卒業研究ではダークマター (暗黒物質) を研究テーマとし、その存在証拠について勉強した。ダークマターは現在まで、いろいろな兆候が確認されているのにも関わらず、いまだ正体がわかっていない。しかし、存在している証拠はたくさんある。本論文では、その暗黒物質の存在証拠についての説明を述べる。まず、準備として暗黒物質とは何か解説する。その後、多くある存在証拠のうち、ツビッキーが行ったビリアル定理を用いた推定、銀河の回転曲線、弾丸銀河団について説明する。また、ダークマターの量を導くことができる宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) に関して簡単に説明する。以上のことを用いて、ダークマター (暗黒物質) が存在することを示していく。

## d12 暗黒物質候補と WIMP ミラクル

私たちの宇宙には、現在の素粒子物理学では説明が難しい未知の物質が存在していることが明らかになっている。そのような未知の物質は、光を発さないことから暗黒物質（ダークマター）と呼ばれている。この卒業研究では暗黒物質の性質としてどのようなものが考えられているかを論じ、今まで提案されてきた暗黒物質候補を紹介する。特に長年暗黒物質の最有力候補であると考えられてきた Weakly Interacting Massive Particle(WIMP) についてその特徴を議論し、初期宇宙の熱力学に基づいて暗黒物質の残存量が観測値を再現する「WIMP ミラクル」と呼ばれる現象を紹介していく。また、WIMP の場合で暗黒物質の残存量と密度パラメータを Boltzmann 方程式を用いて計算し、解析する。

## d13 弱い相互作用と WIMP 暗黒物質模型

この卒業研究では、素粒子論の観点から暗黒物質の有力候補とされている Weakly Interacting Massive Particles(WIMP) について研究した。WIMP には様々な模型の粒子が示唆されており、その粒子を観測するために様々な探索が行われている。暗黒物質の質量を弱い相互作用をする粒子のスケール程度にすると現在の暗黒物質の残存量と一致する。そこで、なぜ WIMP が候補になるのか、WIMP の候補にはどのような模型の粒子があるのか紹介し、現在主に行われている3つの探索について紹介する。そして弱い相互作用を記述する電弱理論から具体的な暗黒物質模型を紹介する。また、地上で行われる直接探索の結果から WIMP の質量と相互作用の大きさの関係についても見ていき、暗黒物質模型が実験結果とどのように結びつくのかを見ていく。

## 固体電子物理研究室

### d14 鉄系超伝導体 FeSe の電気化学的合成と測定用電子回路の作製

鉄系超伝導体は、2008年に発見された超伝導体であり、超伝導転移温度が比較的高い。研究室では、電気化学法で FeSe を合成してきた。この製法のメリットは、室温で作れることと、元素比の制御が容易なことである。良質な薄膜 FeSe を作成するための条件である電位を知るためには、サイクリックボルタンメトリーを使うのが良いとされている。本研究では、この電位を調べる際に必要な電子回路を、オペアンプ、タイマー IC などを組み合わせて作製した。また、CV の際、溶液の pH やグルコン酸の量を変更したり、気体を変えてパブリングを行ったりして様々な条件で比較した。発表では、作製した電子回路について解説し、この回路によって測定した CV と、作成した物質について報告する。

### d15 Phonopy と Quantum Espresso によるフォノンの第一原理計算

Phonopy はフォノン計算のためのオープンソース計算コードで、第一原理計算のソフトウェアと組み合わせて利用することで固体のフォノンに関する物理量を計算することができ、Quantum Espresso は第一原理計算ソフトで、密度汎関数法、平面波近似モデル、擬ポテンシャルモデルに基づく計算と基底状態計算などの計算ができる。本研究では Phonopy と Quantum Espresso を用いて、 $\text{MgB}_2$  のフォノン分散を第一原理計算により求めた。計算の流れだが、まずインプットファイルを作成し、PWscf 計算を行う。得られたアウトプットからバンド構造、状態密度 (DOS) を計算するために、インプットファイルの格子定数、波動関数と電荷密度のカットオフ、収束条件、金属のブリルアンゾーン積分のためのガウスの広がり値を設定していく。それぞれのパラメータには注意点もあり、パラメータの値を変えながら計算を進めた。

### d16 DV- $X\alpha$ 法を用いた銅酸化物超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 系の電子状態計算

銅酸化物高温超伝導体である  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  は初めて発見された液体窒素の沸点 77K を超える超伝導転移温度をもつ超伝導体である。この物質は層状ペロブスカイト構造と呼ばれる結晶構造をとり、略称として YBCO と書かれる。 $\delta$  は酸素欠損量といわれ YBCO では  $\delta$  によって結晶構造が変化する。例えば、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$  の結晶構造は正方晶であり、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  の結晶構造は斜方晶である。結晶構造が変化するると物性も変化する。その物性を求めるための計算方法として DV- $X\alpha$  法というものがある。この方法は分子軌道計算法の一つであり、経験的なパラメータを用いずに計算できる第一原理計算法に分類される。今回の研究ではこの DV- $X\alpha$  法を用いて YBCO の分子軌道計算を行い、バンド理論に基づいて物性を調べることを目的とする。

### d17 容量法による複素誘電率の測定

本研究では銅酸化物高温超伝導体と関連が深い、酸化物誘電体を研究対象とする。誘電率とは物質の分極のしやすさを表し、コンデンサ用材料などの性能評価において一つの指標となる。よって、誘電率を測定することは誘電体の特性を評価する上で大変重要な情報であり、誘電率を計測する装置は汎用的に使用される。また、損失に関する指標として誘電正接があり、複素誘電率の実部と虚部の割合によって表される。誘電正接を算出することで、寄生抵抗による電気エネルギーの損失を調べることができ、試料の絶縁性の評価に応用される。測定には LCR メータを使用し、容量法という手法で複素誘電率と誘電正接の算出を行った。本研究では酸化物誘電体において代表的な  $\text{BaTiO}_3$  のほか、食塩や水道水といった身近なものも測定した。また、LCR メータに関する動作の理解を深めるため、発振器の作成を行った。

### d18 銅酸化物高温超伝導体 Bi2212 の Ni-Zn 同時置換効果

高温超伝導体である Bi2212 の Cu サイトに Ni と Zn を同時置換した時、Ni,Zn それぞれを単独置換した時と比べて超伝導転移温度  $T_c$  が緩和されるかを検証する。過去の卒業研究では YBCO の研究が主に進められてきたが YBCO は構造上2つの Cu サイトがあり CuO 鎖部にも置換されるためその影響がわかりづらい。しかし Bi2212 は Cu サイトが1つしか存在せず、Ni と Zn が全て CuO<sub>2</sub> 面に置換されるためその影響がわかりやすい。本研究では Bi2212 に Ni,Zn それぞれを単独置換したものと Ni と Zn を同時置換した試料を作製する。そしてその試料を粉末 X 線回析によって正しく置換されたか確認する。また交流磁化率測定によってそれぞれの転移温度を測定し、置換濃度を変えた時の低下率によって転移温度が緩和されるかを検証する。

## d19 単相 NdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> の作成と最適ドーブに対応するアニール温度の調査

銅酸化物超伝導体 REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (RE123) 系では、RE サイトのランタノイドによる置換において、イオン半径が大きくなるほど超伝導転移温度  $T_c$  が高くなる特性がある。しかし、イオン半径が大きくなるほど RE/Ba 置換が起こりやすくなり、これは  $T_c$  を低下させる原因となる。また、RE123 系で、酸素欠損量  $\delta$  は焼成時の温度や酸素分圧を変化させることによって制御できる。この  $\delta$  と  $T_c$  には依存性があり、縦軸に  $T_c$ 、横軸に  $\delta$  を取ると、ドーム状の形状を取る。このドームの頂点にあたる  $\delta$  のことを最適ドーブ量と呼ぶ。本研究では、RE123 系の RE を Nd に置換した、単相 Nd123 を作成し、アニール処理温度を制御することで、最適ドーブ量に対応する、アニール処理温度の調査を行った。

## d20 高温超伝導体 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> における Y サイトの Al 置換の検証

Y の代わりに Al を使用し、高温超伝導体 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> の Y サイトへ Al ドーピングすると、濃度 50 % まで Al に置換した Y<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> が生成される事が先行研究にて判明している。本研究では、先行研究の真偽を確かめる為、論文通りの手順で空気を流しながら焼成し、実際に 5 つの試料 ( $x = 0 \sim 0.6$ ) を作製し、粉末 X 線回折で結晶構造を調べて Al の行方を調べた。作製試料を調べた結果、原料の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> はほとんど反応し、YBCO 構造とともに主な不純物である BaCuO<sub>2</sub> の構造も見られた。更に Al の置換量を増やすと Al<sub>2</sub>BaO<sub>4</sub> が見られた。また、Al の一部は BaCuO<sub>2</sub> の Ba サイトに置換されたと推察する。先行研究通りにならなかった要因としては、焼成時に先行研究の環境を再現する為に空気を送り込みながら焼いた為、何らかの要因で電気炉内の温度が均一にならなかったことにより不純物が焼成されてしまったと推察する。