

令和2年度近畿大学工学部物理学コース 卒業研究発表会

令和3年2月3日（水）09:30—13:15 於 31号館 803, 604, 401, 402, 301 教室

プログラム

09:30-09:33 開会の辞：堂寺先生 於 Zoom メインセッション（全員）
-09:35 参加したい班の Zoom ブレイクアウトルームへ移動（全員）

A 班 803 教室 12 名

1. 宇宙論研究室（井上研：5名） 09:35—11:00 座長：段下先生
休憩 15 分 11:00—11:15
2. 量子多体物理学研究室（段下研：7名） 11:15—13:14 座長：井上先生

B 班 604 教室 12 名

1. 生物物理学研究室（矢野研：6名） 09:35—11:17 座長：西山先生
休憩 15 分 11:17—11:32
2. 固体電子物理研究室（増井研：1名） 11:32—11:49 座長：矢野先生
3. 生命動態物理学研究室（西山研：5名） 11:49—13:14 座長：増井先生

C 班 401 教室 12 名

1. 一般相対論・宇宙論研究室（石橋研：7名） 09:35—11:34 座長：笠松先生
休憩 15 分 11:34—11:49
2. 物性理論研究室（笠松研：5名） 11:49—13:14 座長：石橋先生

D 班 402 教室 12 名

1. 素粒子現象論研究室（大村研：6名） 09:35—11:17 座長：堂寺先生
休憩 15 分 11:17—11:32
2. ソフトマター物理学研究室（堂寺研：6名） 11:32—13:14 座長：大村先生

E 班 301 教室 11 名

1. 量子制御研究室（近藤研：4名） 09:35—10:43 座長：太田先生
休憩 15 分 10:43—10:58
 2. 素粒子論・重力理論研究室（太田研：4名） 10:58—12:06 座長：加藤先生
 3. 素粒子実験研究室（加藤研：3名） 12:06—12:57 座長：近藤先生
-

祝賀会：オンライン 17:30-18:30

乾杯：大村先生

卒業研究発表を終えて：各研究室の学生代表

総評：太田先生

閉会の辞：石橋

- 発表時間一人当たり 17 分（12 分発表+3 分質疑応答+ 2 分交代等による空費）
- ベルは発表経過時間 10 分, 12 分, 15 分. ベル係は各班において発表時間がない研究室が担当.
- 9:20 迄に 4 年生と教員は発表割り当て教室に集合, オンライン接続と教室発表の準備.
- 9:20 迄に 3 年生はオンライン接続. ブレイクアウト・ルーム機能等を確認する.
各自 Zoom を最新版にアップデートしておくこと. ID・パスコードは Google クラスルーム（卒研ゼミ）に掲示.
<https://testkindai.zoom.us/j/93068502961?pwd=OEE3aVJhcmVWQ0hrazZOSVB0WlJlU09>
ミーティング ID: 930 6850 2961 パスコード: 536482
- 感染防止のために全員マスク着用、手指消毒をしっかりと行う。休憩時間（その他適宜）に換気を行う。

発表者・題名・概要

A 班

宇宙論研究室

17-1-032-0363 ニューラルネットワークの学習法

ニューラルネットワークとは脳を模したアルゴリズムのモデルである。ニューラルネットワークは学習という予め与えられた訓練データを元に最適な重みパラメータを決定することができるという特徴を持つ。学習の基本は学習の指標となる損失関数を最も小さい値を得るように重みパラメータを変えて勾配を更新を繰り返すというもので、その手法には単に扱っている損失関数の数値微分と連鎖律を元にした誤差逆伝播法によるものがある。本発表では、損失関数を指標にした学習の手法である数値微分によるものと、誤差逆伝播法による手法を説明する。また、ニューラルネットワークの学習を行う上で重要なテクニックであるパラメータの更新方法、重みパラメータの初期値の与え方、Batch Normalization、Dropout などの現代のニューラルネットワークに使われている技術について説明する。

17-1-032-0307 地球大気が月の観測に及ぼす影響について

月や太陽の光は白色に見えるが、実際には様々な色の光が混ぜ合わさっている。色の違いは波長の違いによる。波長が短い光は青っぽく見え、波長の短い光は赤っぽく見える。天体から発する光を波長ごとに分けて、スペクトルを取得する観測を分光観測と呼び、分光観測を行うために用いる装置の事を分光器と呼ぶ。スペクトルを取得することによって天体の組成や物理状態を調べることが出来る。本来分光器は入射スリットによって入射光を細長い領域に絞るが、スマートフォンに付属しているカメラのレンズに回折格子(グレーティング)シートを貼るだけでも簡易的な分光器となり、分光観測が可能である。本発表では、地球大気が月の分光観測に及ぼす影響について簡易分光器を使って調べた結果について報告する。

17-1-032-0341 活動銀河核からの X 線放射の起源

活動銀河核は、銀河全体にも匹敵する膨大なエネルギーを放射している銀河の中心領域のことである。その膨大なエネルギーを生み出す機構として、中心天体へのガスの降着が考えられている。速い速度で周回するガスの摩擦により、活動銀河核は光る。まず、ある条件のもとで、ブラックホールなどのコンパクト天体に、ガスが球対称に降着するモデルで解析する。次に、粘性を考えた標準円盤モデルでも解析し、考察する。活動銀河核から放射されるエネルギーのスペクトルから、活動銀河核は、紫外線から赤外線領域で強い放射をする一方で、高エネルギーである X 線も放射していることが分かっている。しかし、X 線を放射する程円盤は高温ではない。本発表では、円盤の有効温度を式で表し、黒体放射近似でスペクトルを計算したものと観測されたスペクトルを比較することによって得られる X 線放射の起源の候補について述べる。

17-1-032-0386 銀河による重力レンズ効果のアニメーション

一般相対性理論により、銀河のような大きな重力源の周りでは時空が歪む。その歪んだ時空を通過した光が偏向され、重力源が凸レンズのような役割を果たす。これを重力レンズ効果という。観測者から見て、光源とレンズがちょうど一直線上に並んでいるとき、環状の像として観測される。これをアインシュタインリングという。本研究では、円対称レンズである特異等温球 (SIS) モデルと、楕円レンズである特異等温楕円体 (SIE) モデルに対し、Python のパッケージである Lenstronomy を用いてシミュレーションを実行し、光源とレンズの相対位置が変化したときの像を調べた。さらに、相対位置による像の見え方の変化を可視化するために、アニメーションを作成した。

15-1-032-0383 光学的重力レンズ模型を使ったアニメーション

一般相対性理論によって、物体が存在する事で重力が生じ、その重力によって歪んだ時空に沿って光路は湾曲することが分かっている。この物質の重力によって光の経路が曲がる効果を重力レンズ効果と呼び、その結果像が複数見えたり、変形したり、光源の明るさが元々の明るさと異なって観測される。光源とレンズと観測者を同一直線上に置いた時にリング状の像であるアインシュタインリングが観測できる。視覚的、直感的理解のため、重力レンズの特異等温球モデル (SIS モデル) を再現する光学模型を解析的に求め、シリコン鋳型にレジンを入れることによって模型を作成し、アインシュタインリングが出来るかどうか確認する。また、重力レンズ現象を引き起こす多くの銀河は楕円銀河であるため、特異等温楕円体モデル (SIE モデル) に対しても重力レンズ模型を作成し、レンズと光源の相対位置による像の形状の変化を可視化する。

量子多体物理学研究室

15-1-032-0315 Rydberg 原子集団を記述する高次元量子 Ising 模型の精密数値解析

光ピンセットにより空間的に規則正しく配列された Rydberg 原子集団は非常に制御性が高いため、量子磁性体の量子シミュレータとしての技術開発が世界各地で進められている。これまでに、空間 1 次元の Rydberg 原子集団を用いて、量子相転移や非平衡ダイナミクスなどの様々な量子物性がこの物理系で調べられている。ごく最近、空間 2 次元の系における量子相転移の観測が報告された。本研究では、Rydberg 原子系で量子シミュレーションすることができる空間 2 次元の縦横磁場反強磁性 Ising 模型に関して、量子モンテカルロ法を用いて基底状態相関を数値的に厳密に求める。空間 1 次元系においては、横磁場がゼロ磁場近傍で増大するにつれて相転移の臨界縦磁場の値が著しく減少することが知られている。対照的に、空間 2 次元系においては臨界縦磁場の値が横磁場の関数としてほぼ一定であることを示す。

15-1-032-0382 Rydberg 状態の衣を着た原子気体における相互作用距離の制御と量子相転移

本研究では、長距離相互作用を持つ量子 Ising 模型を量子シミュレーションすることができる Rydberg 原子集団を理論的に調べる。レーザーによるラビ結合の強さよりも離調が十分大きいときは、基底状態に弱く Rydberg 状態が重ね合わさった状態 (Rydberg ドレスト状態) が実現する。この Rydberg ドレスト状態を利用して Ising 模型の長距離相互作用を制御した実験について紹介する。最も単純な強磁性の横磁場 Ising 模型でステップ関数型の長距離相互作用がある場合に焦点を当て、常磁性相と強磁性相の間の量子相転移を数値的に調べる。平均場近似に加えて、比較的手軽で量子ゆらぎをある程度まで取り込むことのできる手法であるクラスター平均場近似を用いる。臨界点の相互作用の距離に対する依存性を調べ、相互作用の距離が増大するにつれてどのように平均場近似の定量性が上がっていくのかを議論する。

17-1-032-0376 多体局在の数値解析

相互作用のある孤立した量子システムの一体ポテンシャルにランダム性があるとき、システムは時間発展後、熱化に失敗し多体局在に陥ることがある。この多体局在現象は光格子中の冷却気体系で実際に観測され、近年大きな注目を集めている。本研究では、ランダムポテンシャルのある次元量子系において多体局在状態と熱化状態の境界を数値的に与える再現性のある方法を開発することを目指す。本発表では、そのための準備として、多体局在現象に関する重要な先行研究の内容を解説し、いくつかの数値計算を再現する。まず数値計算を行う数理モデルを解説する。次に熱化相と多体局在相を見分ける様々な数値シミュレーションの手法について解説する。その一つとして多体局在相の特徴であるエンタングルメントエントロピーの対数成長について注目し、実際に行った数値シミュレーションの方法と結果を解説する。

17-1-032-0387 光格子中の Bose 気体の超流動状態に対する局所的な散逸の誘起する転移

近年、冷却原子系を用いた実験において、散逸の強さを高い精度で制御して量子多体系に対する散逸の影響を調べる研究が行われている。また最近の理論研究では、制御可能な散逸を持つ空間 1 次元の Bose-Hubbard 系において、観測による量子状態の変化が転移として現れることが示されている。本研究では、冷却原子系の光散乱に対応する散逸の場合に、散逸誘起の転移が起こりうるかどうかを調べる。初期状態として超流動状態を取り、Gutzwiller 近似を用いて Lindblad 方程式を解くことで 3 次元の散逸 Bose-Hubbard 模型のダイナミクスを解析する。サイト全体に少しでも散逸がかかっている場合、超流動状態が崩壊してしまうことを示す。一方、局所的に散逸を入れた場合では超流動状態が残ることがあり、散逸を加える空間領域や粒子数密度を変化させた時に超流動状態から常流動状態への転移が起こることを明らかにする。

17-1-032-0314 Gutzwiller 近似法による光格子中の Bose 気体の超流動流の安定性解析

Bose-Einstein 凝縮した冷却原子系気体を実現して以来、この系での超流動現象の研究は着実に発展してきた。例えば極低温気体を光格子中に閉じ込めることで、超流動性に対する粒子間相互作用の効果が明らかにされてきた。そうした効果の一つとして、斥力相互作用の増大に伴って超流動流臨界運動量が著しく減少することが知られている。また近年、光格子中の二軌道 Bose 気体を実現されている。この系において、相互作用が弱い場合には、ごく僅かな軌道間混成によって臨界運動量が急峻に減少することが示されている。本研究では、相互作用が強い場合に二軌道 Bose 気体の超流動流臨界運動量を解析し、軌道間混成と強い相互作用の協奏に起因する新奇な効果を開拓することを目指す。具体的には Gutzwiller 近似法を用いて定常解から励起の分散関係を求める。求めた励起の振動数から臨界運動量を決定し超流動流の安定性を判定する。

17-1-032-0333 トラップされたイオン集団を用いた Jaynes-Cummings-Hubbard 模型の量子シミュレーション

真空中にトラップされたイオン集団を Lamb-Dicke 領域まで冷却すると、レーザーを用いてその量子状態を高精度に制御することができる。具体的には、イオンの適当な 2 つの内部状態を量子ビット、イオントラップ中の振動状態を Bose 粒子 (フォノン) とみなし、さらにレーザーを用いてこれらの量子ビットとフォノンを結合することで、Jaynes-Cummings-Hubbard (JCH) 模型で記述される量子多体系となる。その高い制御性のために、この系は JCH 模型の量子シミュレーションに応用できることが期待されている。本研究では、トラップされたイオン集団からなる JCH 模型において、フォノンの Bose-Einstein 凝縮 (BEC) 相に注目し、その超流動性を調べる。具体的には Gross-Pitaevskii 方程式を解くことで、系のエネルギー分散関係を求め、BEC の安定性解析を行う。

17-1-032-0355 X 線反射率法による水面上リン脂質単分子の構造研究 1

両親媒性分子とは極性部分と無極性部分で構成される分子で、この分子は水面上で単分子膜を形成する。細胞膜の構成部分であるリン脂質も両親媒性分子で、その中で DPPC は極性の頭部に無極性の尾部が 2 つ付く分子である。DPPC が水面上に膜を形成すると頭部は水に溶けるが、無極性の尾部を気体相に配向する。我々は X 線反射率法を用いて水面上の DPPC の膜厚を測定し、この厚さの中で尾部が占めている長さや水面に対する垂直方向からの角度を求めた。その結果、20 °C では膜厚が 18.2 Å だが、30 °C では 20.3 Å になり、30 °C の方が膜厚が増した。これは温度が上がると DPPC は広がって膜厚が減るだろうという予想と反対で、水溶液中の DPPC が水面に吸着したためだと考えられる。

B 班

生物物理学研究室

17-1-032-0318 石鹼ボートを用いた実験教材の開発

石鹼ボートとは水に浮かべた小片の端に界面活性剤を滴下することにより表面張力が小さくなり表面張力の大きい方へ動く現象である。中学校理科の学習指導要領解説の目標 (2) には観察、実験などを行い、科学的に探究する力を養うと書かれている。そこで実験を通して身の回りの出来事に疑問や理科に興味を持ってもらうにはどうするか考え実験教材の開発を行うことにした。石鹼ボートは子どもから大人まで楽しめる題材でありボートの形や界面活性剤を変えるなど様々な工夫を行うことができる。また石鹼ボートを通して表面張力など背景にある理科を学ぶこともできると考える。本研究では 2 つ実験を行った。1 つ目は炭素数の異なる界面活性剤による速度の比較の実験である。2 つ目は形の異なる紙ボートによる速度の比較である。この 2 つの実験を通して実際に中学生にどのような実験を行えばいいか考える。

17-1-032-0301 水面に形成した膜とマランゴニ対流による表面張力の自発振動の関係

マランゴニ対流とは、液体表面に作用する表面張力や異なる液体間に生じる表面張力によって引き起こされる流れのことである。このとき、液体表面の濃度変化により表面張力の不均一が生じるため流動現象が起き、表面張力が自発的に振動する場合がある。2019 年度の卒業研究ではリン脂質の中から DPPC を水面に展開し、マランゴニ対流による自発振動を発生させ、表面張力の測定を行った。結果より振幅は膜の弾性定数が関係していることを見いだした。今回の実験では、DPPC とコレステロールの混合液を水面に展開し、マランゴニ対流による自発振動を観測する。コレステロールは、膜の流動性を調節する働きを持っているため、本研究では、DPPC とコレステロールの混合液の場合、膜の弾性定数が周期・振幅に影響を与えるのか考察していく。

17-1-032-0344 マランゴニ対流による表面張力の自発振動に見られる減衰振動の研究

界面活性剤の液滴を水中に保持するとマランゴニ対流が周期的に発生し、それにもない表面張力が振動する現象が見られる。この表面張力の自発振動では、表面張力が急激に減少した後、ゆっくりと元の値に戻っていく。このとき、水面では、界面活性剤から遠ざかる方向に大きな流れが生じていることが報告されている。一方、このような表面張力の変化に高い振動数の振動が重なっていることが観測された。この振動は減衰振動ではないかと考え、本研究ではその振動の原因をさぐる。本実験ではトラフに満たされた超純水の水面下にヘプタノールの液滴を作り、液体表面にリン脂質を展開することで振動がより顕著になるようにした。リン脂質を 4 種類用いてそれぞれマランゴニ対流を発生させ、その振動について研究を行った。この減衰振動を決めるパラメータと、分子間力の関係について考察する。

17-1-032-0345 塩水振動子の周期測定とシミュレーション

流体現象を用いて工夫すると様々なリズム運動が観測できる。その一つとして真水を入れた大きなカップの中に、底に穴の開けた塩水の入っているカップを入れる。しばらくすると、塩水が真水に流れる下向き流と真水が塩水に流れる上向き流が交互にとるリズム運動が見られる。これを塩水振動子という。塩水のリズム運動は 1970 年に海洋学者マーチンが発見した現象である。塩水振動子は様々な条件によって振動や周期が変化するのだが、実験の測定数値でもって条件を解明したい。本研究ではこの塩水振動子という現象を数理的にモデル化して解析し、塩水濃度、カップの直径、カップの穴の直径を変えた時の振動周期を測定し、その関係について調べると共に、塩水振動子の方程式を用いてシミュレートした結果と比較して考察した。

16-1-032-0302 塩水振動における塩水の吐出解析

適当な大きさの水槽に水を張り、底に小さな穴をあけた塩水の入ったカップを固定する。水面がほぼ同じくらいになるように静置させると、小さな穴を塩水が下向きに流れる状態と真水が上向きに流れる状態を交互に繰り返す現象が起きる。これを塩水振動子と呼ぶ。塩水振動子の特徴としては、上下運動をしているカップに振動を与えてリズムを乱しても、時間が経過するにつれて元のリズムに戻る現象が起きる。本実験では、水槽の底からカップの塩水面までの距離を変化させ、どれほど振動周期に影響があるか研究を行った。距離が短くなるほど、カップの底から塩水が吐出する勢いが強くなり、振動している時間が短くなることがわかった。これは位置エネルギーが減少すると塩水が勢いよく吐出し動圧（運動エネルギー）が増加することからベルヌーイの定理からも示すことができた。

17-1-032-0326 アンチバブルの膜厚と寿命の関係

石鹼水とストローでできる身近な現象として、「シャボン玉」があり、またその二つを用いる現象でアンチバブルがある。アンチバブルとは、逆シャボン玉とも呼ばれ、空気中に浮くシャボン玉と逆の構造を持ち、親水基と疎水基からなる界面活性剤、水、空気で作成される。溶液に落とされた液柱が一体化する事なく液中に入り込み、液体の小球を取り囲む薄い球体の空気の膜で構成される流体である。アンチバブルは石鹼水に限らず、油、コーヒー、ビールなど、我々の身近なもので見られ、さらには原子力発電施設で用いられる冷却水中でも起こりうる。先行研究では溶液の粘性をあげるとアンチバブルの膜厚、寿命がどうなるのかは実験されていない。本研究では、界面活性剤水溶液にグリセリンを添加することによって、水溶液の粘性を上げる。それによる膜厚と寿命について観測し、その結果から、アンチバブル生成のメカニズムを考察する。

固体電子物理研究室

17-1-032-0375 Fe-Te 水溶液の CV 測定

鉄系超伝導体である β -FeSe は Se サイトの一部を Te で置換すると超伝導転移温度 T_c が上昇することが報告されている。当研究室では電析法を用いて FeSe や FeTe の作成と分析を行い、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ の研究への足がかりにしようとして試みている。電析を行う際には、電極電位の決定や溶液中の電極反応の様子を知るために CV 測定がよく用いられる。

当研究では、先行研究で行われたサイクリックボルタンメトリー (CV) 測定について見直しを行い、ポテンシオスタットの代替とする電子回路を作成、デジタルマルチメーター (DMM) の測定を自動化するプログラムの改良を行った。この改良を行ったシステムを用いて先行研究での Fe-Te 混合溶液での CV 測定のやり直し、その結果を用いて先行研究で行われた FeTe 合金の電析について考察を行った。

生命動態物理学研究室

17-1-032-0349 高圧力下での精子鞭毛運動イメージング

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ィルスなどの異物を体外へと排出するはたらきがある。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、細胞外からの物理的な刺激や化学的な刺激に応じて大きく変化する事が知られている。本研究では、等方的で様な力学刺激である静水圧を用いて、精子鞭毛に刺激を与え、その応答を可視化する研究を実施した。卒業研究発表会では、高圧力顕微鏡により直接観察した精子鞭毛の動きについて報告する。

16-1-032-0332 高圧下での深海微生物の運動観察

地球表面の約 7 割は海洋であり、その平均深度は 3000 m を超えている。こうした深い海の底では、低温かつ高圧の環境でありながら、多くの生物が生息していることが知られている。本研究では、JAMSTEC の有人探査艇しんかい 6500 により深度約 6300 m から採取された *Moritella japonica* DSK1 株を用いて、高圧下での遊泳運動観察を行った。高圧力顕微鏡を用いて DSK1 株を観察し、遊泳する菌体の割合と速度の圧力依存性を調べた。その結果、DSK1 株の遊泳運動能は、圧力増加と共に少しずつ低下することが明らかになった。ただ、浅瀬に生息する DSK1 株の近縁種 (*Vibrio alginolyticus*) と比べると圧力依存性がゆるやかであることから、DSK1 株は高い圧力環境に適応することで、高圧力下での運動能の低下を抑制できていることが判明した。

17-1-032-0337 バクテリア遊泳運動の圧力応答イメージング

大腸菌は、細胞表面にあるレセプターで化学物質や温度などの環境変化を知覚している。周囲の環境変化を知覚しながら、直線的な遊泳運動と方向転換を使い分けることでより良い環境へと移動できる。これまでの研究では、溶液の温度を変化させることで、菌体がどのように応答するのかを調べられてきた。しかしながら、系全体の温度を瞬時に変えることは技術的に困難であった。そこで本研究では、温度と並ぶ代表的な熱力学パラメーターである圧力に着目し、圧力変化に対する大腸菌の速い応答を精査する研究を行った。高圧力顕微鏡を用いて大腸菌の応答を観察したところ、菌体は圧力変化に呼応して遊泳運動の仕方を変化させることを明らかにできた。

17-1-032-0342 バクテリア遊泳運動の環境応答イメージング

新型コロナウイルス感染症による被害が拡大する中、私達はアルコール消毒液を用いて、手や指の殺菌を日常的に行うようになってきている。これは、高濃度のアルコール溶液にはウィルスや細菌などを無毒化するはたらきがあるからである。これまでから、アルコールがどのように菌体に作用するのか調べるため、大腸菌をモデル生物として研究が進められてきた。本研究では、顕微鏡下での評価を行いやすい大腸菌の遊泳運動能に着目した研究に取り組んだ。1%のエタノール濃度下では、大腸菌の遊泳運動能に大きな変化はなく、10%濃度下では遊泳速度が大幅に低下し、70%では完全に運動能が失われた。卒業研究発表会では、エタノール存在下で、さらに物理的な環境要因を変えることで運動能がどのように変化したかを報告する。

17-1-032-0370 麻酔薬の圧拮抗作用の実時間イメージング

全身麻酔薬は、今日の医療現場で日常的に使用されているものの、その作用機序は明らかになっていない。現在提唱されている説の内の 1 つに脂質説がある。この説では、麻酔薬は脂質膜に溶け込んでから膜タンパク質に作用することで、神経活動を阻害し機能を低下させると考えられている。この脂質説の根拠の一つとして麻酔薬の圧拮抗作用がある。この圧拮抗作用は 1950 年に Johnson らによって報告されたものだが、その詳細については記載されていなかった。本研究では、最大 5 MPa までの静水圧をかけることができる大型圧力チャンバーを用いて、オタマジャクシ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行った。卒業研究発表会では、高圧力下で泳ぎだしたおたまじゃくし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。

C 班

一般相対論・宇宙論研究室

15-1-032-0381 光的および時間的測地線に基づく Schwarzschild 時空の拡張

Schwarzschild 解は、アインシュタイン方程式の静的球対称真空解であり、最も単純なブラックホール時空を記述する。標準的な Schwarzschild 座標系は、ブラックホールの事象の地平面にあたる Schwarzschild 半径の外部領域しか覆わない。その内部領域を記述するために、さまざまな異なる座標系が考案されている。それらの座標系の内、Kruskal-Szekeres (KS) 座標によって Schwarzschild 時空を最大拡張すると、Kruskal 図による時空の大域的全体構造について理解することができる。しかし、KS 座標は構造が複雑で、扱うことが困難である。そこで本発表では、KS 座標より単純だが物理的解釈のできる座標系として、光の測地線に基づいた Eddington-Finkelstein (EF) 座標と時間的測地線に基づく Painleve-Gullstrand(PG) 座標を紹介し、それらを用いた時空の拡張について説明する。

17-1-032-0380 Black Hole 時空の解析接続

2020 年度のノーベル物理学賞で、ゲンツェル博士、ゲズ博士の研究にあるように、天の川の中にはブラックホールと確実視される天体が存在する。そして、同じく受賞者のペンローズ博士が証明したように、その内部には特異点が存在する。ブラックホールの最も簡単な例である Schwarzschild 時空には二つの特異点がある。一つは中心の特異点であり、もう一つは Schwarzschild 半径 (ホライズン) である。後者は標準的な Schwarzschild 座標が適さない見かけの特異点である。本発表では、先ず Eddington-Finkelstein 座標を導入することにより、ホライズンの外部から内部領域へ時空を拡張する方法を説明する。次に、宇宙に存在するより現実的な回転ブラックホールを記述する Kerr 解についても、ホライズンの外部から内部領域へ拡張するための座標系について考察する。特に、比較的新しく導入された Doran 座標を紹介する。この座標系は、自由落下する観測者の固有時間を表す時間座標を含んだものであることを解説する。

17-1-032-0373 Schwarzschild 及び Reissner-Nordstrom ブラックホールにおける粒子の軌道半径

2019 年 4 月 10 日に EHT 国際共同研究グループが楕円銀河 M87 の中心にある巨大ブラックホールの影の撮影に成功したと発表した。その結果は、ブラックホール時空における光の振舞いについて一般相対論が予言する通りであった。本発表では、球対称真空ブラックホールである Schwarzschild 時空での光の測地線方程式を考えることにより、光の捕獲半径やブラックホール・シャドウの半径が、質量によりどのように決まるのか解説する。また、質量のある粒子の最小安定軌道 (ISCO) の大きさを解説する。Schwarzschild 時空が質量のみをパラメータとするのに対し、Reissner-Nordstrom 時空は同じく静的球対称であるが、質量と電荷の 2 つのパラメータを持つ。そのため、質量と角運動量の 2 つのパラメータをもつ Kerr ブラックホール時空と類似の性質をもつ一方、静的であるため解析しやすい利点がある。そこで、Reissner-Nordstrom 時空においても光の測地線や自由粒子の円軌道半径がどのように表されるのかを解説する。

17-1-032-0310 球対称ブラックホール時空における光の測地線

一般相対論における強い重力場中の現象を理解するには、典型例として Schwarzschild 時空を考えることで、多くの示唆を得ることができる。また、重力には時空そのものを歪める性質があるため、質量をもたない光であっても歪曲する。さらに、ある条件下においては単に光線が歪曲するだけでなく、ブラックホールに対して束縛運動する場合や、ブラックホール近傍から外部へ光が到達しない場合も考えることができる。後者は、光的測地線の束について膨張率を考えることで導かれる「捕捉面」の議論に帰結する。本発表では Schwarzschild 解と、これに電荷を含むように拡張した Reissner-Nordstrom 解について、ブラックホール近傍における光的測地線や捕捉面を考えることで、光の振舞いについて説明する。

17-1-032-0302 Black Hole の内部構造

一般相対論では、高々電磁場を含む球対称なブラックホールには、質量 M のみで定まる Schwarzschild 解と、電荷 Q を帯びた Reissner-Nordstrom 解がある。後者は、二つのパラメータ (M, Q) に対応して、一般に二つの地平面 (ホライズン) を持つ。しかし現実の宇宙では電荷をもつ巨視的物体は存在しえない。そこで本論文では、Schwarzschild 解や Reissner-Nordstrom 解と並んで基本的な解であり、質量と角運動量 J を表す二つのパラメータをもつ Kerr 解も合わせて、これら 3 つのブラックホールの時空構造を考察する。特に、パラメータ M, Q, J の大小関係と地平面の数や、地平面を超えて時空を拡張するための適切な座標系について考察する。また、Reissner-Nordstrom 解に宇宙項を付け加えた RNdS 解上での荷電粒子の運動についても解説する。

17-1-032-0378 Reissner-Nordstrom(RN) および Kerr ブラックホールの類似性と extreme RN 解

宇宙に存在する多くの天体は回転運動を伴う。それと同様に実際のブラックホールも角運動量を持つ Kerr 解により記述されると考えられる。しかし、Kerr 解は複雑で解析は困難である。そこで、回転のない静的球対称真空解である Schwarzschild 解に電場を導入した荷電ブラックホールを考察する。さらに Kerr 解で電荷がなく角運動量のみを持つ回転ブラックホールを解説する。一般にブラックホールは質量、電荷、角運動量の 3 つのパラメータを含んでいるが、その質量と電荷の関係、質量と角運動量の関係によりブラックホールの事象の地平面の様子がどのようになるか考察する。本発表では、この類似点を見ることにより電荷をもつ Reissner-Nordstrom(RN) ブラックホールが Kerr ブラックホールの理解にとっても示唆的であることを解説する。加えて、極限 ($Q = M$) RN の場合のブラックホール解と Majumdar-Papapetrou(MP) 計量の場合のブラックホールの類似性について解説する。

17-1-032-0335 Kerr 時空の Einstein-Rosen 橋と荷電多重ブラックホール解

Schwarzschild 時空を最大拡張した Kruskal 時空を考えると 2 つの異なる漸近平坦時空を繋げるワームホールの構造を考えることができる。その中間点にある極小曲面は Einstein-Rosen 橋 (ER 橋) と呼ばれる。静的球対称荷電ブラックホールにおいて、電荷 Q と質量 M の関係を見ると 3 通りの状況が考えられる。特に、電荷 Q が臨界値に近づく場合は ER 橋が無数の長さをもち、繋いでいる外部時空へ通過は不可能になる。さて、静的というのは回転していない状態のことを指しているが、現実には存在しているブラックホールは回転している。本発表では、回転ブラックホールの質量 M と角運動量パラメータ a の関係について解説したのち、それぞれの ER 橋を考える。また、宇宙項 Λ を持つ荷電ブラックホールを表す RNdS 計量で帯電した試験粒子の運動から、Kastor-Traschen 解における複数のブラックホールが互いに及ぼす影響についても考察する。

物性理論研究室

16-1-032-0308 斜方投射の軌道の空気抵抗依存性

角度 θ で物体を投射したとき、空気抵抗がない場合は水平到達距離は角度 θ と初速度 v_0 で決まる。空気抵抗があるときは、その距離は空気抵抗の係数 k にも依存する。空気抵抗には、速度 v に比例する粘性抵抗と速度 v の二乗に比例する慣性抵抗がある。粘性抵抗と慣性抵抗が等しくなる速度 v_c に対して速度 v が小さいと、粘性抵抗は慣性抵抗より大きくなる。逆に、粘性抵抗と慣性抵抗が等しくなる速度 v_c に対して速度 v が大きいと、粘性抵抗は慣性抵抗より小さくなる。一般的に空気抵抗は粘性抵抗と慣性抵抗の和となるが、今回は 2 つの抵抗力のうち小さいほうを無視し、問題を簡略化する。空気抵抗により斜方投射の軌道がどのように変わるかについて報告する。

17-1-032-0305 ラビ結合した 2 成分ボースアインシュタイン凝縮体における相対位相のドメインウォールの衝突

Bose-Einstein 凝縮は 1925 年に Bose によって予言された。そして、理想ボース気体に近い中性原子気体のボースアインシュタイン凝縮体 (BEC) が、それから 70 年後の 1995 年に初めて実験的に実現された。現在では、このボースアインシュタイン凝縮とそれに関連した様々な物理現象が盛んに研究されている。今、異なるスピン状態を持つような 2 成分 BEC を考える。この系に対して 2 成分のエネルギー状態の差に対応する周波数を持つような電磁波を入射すると、粒子が 2 つの準位の間で振動することが知られている。この現象をラビ振動と呼び、この振動に起因する結合をラビ結合という。この時、2 つの凝縮体の相対位相が 2π まきついたドメインウォールが存在することが知られている。本研究では、ドメインウォール同士を衝突させ、どのような相互作用が起きるかを数値実験を用いて調べる。

17-1-032-0366 遠距離相互作用を持つ離散的なボース・アインシュタイン凝縮体における discrete breather について

ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) とは、1925 年にアインシュタインにより予言された現象である。そして 1995 年には中性原子気体のボース・アインシュタイン凝縮が実験で示された。現在もこのボース・アインシュタイン凝縮とそれに関連した様々な物理現象について盛んに研究されている。今、1 次元 BEC について考える。この BEC にレーザー光を用いた光格子という周期的なポテンシャルを与えると、定在波の腹の部分に BEC が局在する状態になり離散的な BEC が出来る。本研究では Gross-Pitaevskii 方程式の数値計算を行い、ボース粒子間に遠距離相互作用がはたらいっていないときの離散的な BEC のダイナミクスである discrete breather と遠距離相互作用がはたらいいているときの離散的な BEC の discrete breather について調べる。

17-1-032-0317 一次元 Bose-Einstein 凝縮体における振動ポテンシャルを用いたソリトン乱流の研究

ボースとアインシュタインが予言した Bose-Einstein 凝縮 (BEC) は現在でも盛んに研究されており、光学技術により凝縮体の振る舞いを制御、可視化することが可能である。本研究では、一次元 BEC において振動ポテンシャルを動かすことによって生成されるダークソリトン乱流について考える。先行研究では二次元 BEC において、振動ポテンシャルを用いてソリトンと量子渦の生成、消滅、結合するような複合ダイナミクスが存在することが理論的に示唆されている。本研究では、冷却原子系を想定し、一次元の Gross-Pitaevskii 方程式を用いて数値計算を行い、振動ポテンシャルが BEC にどのような変化を与えるのかを考察する。

17-1-032-0330 量子揺らぎによって実現する量子液滴の衝突の理論解析

超低温領域の原子気体の実験で、気体が広がって一様に分布せずに、非常に希薄な状態の量子液相となることが観察されており、その量子液相は量子液滴と呼ばれるようになった。Dmitry Petrov の理論的提案では、2 成分 Bose-Einstein 凝縮体の原子間相互作用を調整し、平均場近似における相互作用項と Lee-Huang-Yang の量子補正項を競合させるように制御することで、自己束縛する量子液滴の作成が可能であると予言した。本研究では Lee-Huang-Yang の量子補正項を含んだ 1 次元 Gross-Pitaevskii 方程式を用いて異なる化学ポテンシャルと位相を持つ量子液滴を衝突させる数値シミュレーションを行う。

D 班

素粒子現象論研究室

17-1-032-0379 Dirac と G.'t Hooft の理論に基づく磁気単極子の研究

卒業研究では、磁気単極子 (モノポール) を研究テーマとし、Dirac と G.'t Hooft の理論を研究した。電磁相互作用は我々の身近に存在する力であり、電荷と電流によって電場と磁場が発生する。この電磁場はマクスウェル方程式によって記述されるが、その方程式には電荷に対応した磁荷は存在していない。磁気単極子 (磁荷) は今のところ発見されていないが、長年研究対象とされており「電荷の量子化」の実現から発見が期待されている。そこで、磁気単極子についての理論がどのようなものであるかを議論していく。Dirac モノポールでは、磁荷が存在するときの磁荷と電荷の関係を議論し、G.'t Hooft モノポールでは、実際に $SO(3)$ 局所ゲージ対称性を持つゲージ理論を構築し、モノポールの解が厳密解として現れることをみる。

17-1-032-0356 ダークマターの証拠と 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す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ダークマターと呼ばれており、このダークマターを卒業研究の研究テーマとし、主にダークマターの残存量計算の方法について研究した。この卒業論文ではダークマターというものが一体何なのか、なぜ存在しているといえるのかをということを始めに紹介する。そして、ダークマター探索実験やダークマターの候補について記述するとともに、ボルツマン方程式に従いダークマターの残存量を計算する。今日ダークマターの候補としては様々なものがあげられており、熱いダークマターと冷たいダークマターに分けられるが、今回は冷たい場合のダークマターの残存量の計算がどのようにできるのかを考えていくことを目的とする。

17-1-032-0352 量子力学から見る粒子のふるまいとベルの不等式を用いた検証

この卒業研究では、目では見えないミクロな物理を記述し、物質をこれ以上に分解することが出来ない最小単位の素粒子を理解する上で不可欠な量子力学を研究テーマとした。これには従来の古典力学では説明をすることが出来ないような特性が多々存在する。そこで今回、粒子の存在とは確率の波であり観測することで初めて波動関数が収縮し粒子となる、そしてそのふるまい方を確認することが出来るという特性に焦点を当てて研究を行った。そこで粒子のふるまい方を確認する為にジョン・スチュワート・ベルによって提唱されたベルの不等式は理論上だけではなく実際に破られるのかどうかを調べる為、アラン・アスペによって行われた実験の検証をプログラミング言語を用いた乱数の生成によって行った。

17-1-032-0331 d ゲージ対称性に基づく素粒子標準模型の構築

この卒業研究では素粒子標準模型を研究テーマとして、素粒子がどのような性質をもち働くのかを研究した。標準模型とは重力を除く 3 つの相互作用がゲージ原理をもとに $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ というゲージ対称性を課すことで得られる。この模型は実験的にも非常に高い精度で検証されており、理論的にも実験的にも成功を収めている。論文ではまず初めに自然界で発見されている物質を構成する素粒子と 4 つの相互作用を紹介し、次に素粒子物理学を勉強する上で非常に重要な場の理論を議論する。さらに相互作用を考慮したゲージ理論をもとにラグランジアンを構築していき、最後に具体例として標準模型を紹介する。この研究を通して、素粒子、および標準模型の本質的な役割を素粒子物理学の視点から理解することを目的とする。

17-1-032-0308 弱い相互作用と暗黒物質の候補

この卒業研究では暗黒物質を研究テーマとし、素粒子論の観点から暗黒物質の可能性について研究した。まず暗黒物質の存在を示唆する観測結果を紹介する。そのあと現在までに観測されている素粒子を紹介し、その素粒子物理を記述する素粒子標準模型のうち、特に電弱相互作用に関して議論する。その構造をもとに暗黒物質が素粒子である場合に、暗黒物質がどのような場で記述されるべきか、暗黒物質が弱い相互作用をする場合には模型はどうあるべきかを論じる。今回は 4 つのモデルをもとに進めていく。最後にそれまで挙げてきた模型について、現在の直接観測などによる実験結果と予言されている Dark Matter の残存量を照らし合わせて、各モデルがどのように考えられるか論じる。

17-1-032-0365 ニュートリノ振動に関する研究

1960 年半ば、デイビスらによって始められた研究によって太陽内部で起こる核融合反応から検出されたニュートリノの数が予想値の 3 分の 1 という結果になった。この理論と実験の不一致は「太陽ニュートリノ問題」とされ、30 年の歳月をかけて解明に至ったが、今日においてもニュートリノは数多くの謎を残している。また、2015 年ノーベル賞を受賞した梶田隆章氏による「ニュートリノ振動」は大変ホットなニュースである。そこで本研究では、はじめにディラック方程式およびラグランジアンによってニュートリノを示し、非常に軽いとされるニュートリノ質量であるシーソー機構に触れながら、最後にニュートリノ振動に関する太陽ニュートリノ、大気ニュートリノの確率や質量差について吟味していく。

ソフトマター物理学研究室

17-1-032-0347 ソフト微粒子を用いた複雑な平面充填の自己組織化シミュレーション

本研究では実験的に再現が難しい複雑な平面充填図形を自己組織化することを目的としている。近年、粒子系の計算機実験でアルキメデスタイリング構造や準結晶構造など様々な複雑平面充填構造が得られている。しかし、実験的にこれらの複雑構造を自己組織化することは難しい。最近、Grillo ら (*Nature* **582**, 219 (2020)) は、自己組織化コロイド結晶の自己組織化を大きく 2 つのステップに分けることで、1 ステップで作成する場合には実現不可能な複雑構造が作成できることを示した。本研究では、この作成法を模して六方格子粒子系をテンプレートとして固定し、その中で Hertz ポテンシャルをもつ可動な斥力粒子系のシミュレーションを行い Grillo ら得た複雑構造の再現を行なった。

17-1-032-0327 モルフォチョウが持つ多層膜構造のスペクトル反射率

この卒業論文では、構造に基づく発色である「構造色」が持つ反射特性について、モルフォチョウを例に挙げて説明する。モルフォチョウは、翅の鱗片にナノスケールの周期的構造を持っており、その構造により光が多層膜干渉を起こすことで特徴的な青色が生じている。その青色発色の仕組みを理解するためには、構造の反射率や透過率を求める必要がある。本論文では、まず、反射率や透過率の計算に用いるフレネルの公式について記述する。次に、多層膜干渉のスペクトル反射率を求めていく。その際に、多層膜干渉を薄膜干渉の積み重ねと考え、多層膜の最下層から遡って反射率を計算していく。そのために多重反射を考慮した薄膜干渉のスペクトル反射率を求める必要があり、それを基に多層膜干渉のスペクトル反射率の計算を行う。最後に、計算結果を実際のモルフォチョウの反射率と比較し、反射特性についての議論を行う。

15-1-032-0305 ジャイロイド構造の音響効果

ジャイロイド構造は、自然界やソフトマターの分野で観察されており、光学や材料科学を始めとして様々な分野で研究が進められているが、音響学の分野では他の分野よりも研究論文の数が少ない。しかしこの構造は、軽量さに対する高いせん断強度から 3D プリンタのインフィルパターンでも用いられており、またミラー指数における 100 方向と 111 方向に貫通孔を持ち、周期的に極小曲面を展開しているこの特異な構造は、構造や素材を制御することで、耐久性が高くかつ優れた吸音・遮音性能を持つ新材料になり得ると考えられている。本研究では 3D プリンタを用いて実物のジャイロイド構造を 3 パターン製造し、その面に 10 段階の周波数をそれぞれ当て、その透過側で騒音計を用いて可聴周波数帯域におけるジャイロイド構造の音響特性を観測しようと試みた。

17-1-032-0382 高分子ジャイロイドをテンプレートにした金属ネットワーク磁性

本研究ではナノスケールにおいて 3 次元らせんネットワーク構造を有するジャイロイドを磁性体で形成し、その複雑な磁気構造を明らかにする。J. Llandro らは、高分子ジャイロイドをテンプレートにして困難とされているナノスケールでの Ni - Fe からなるジャイロイド構造の作成に成功し、さらに電子ホログラフィーでそのマイクロ磁気構造を観測した (*Visualizing Magnetic Structure in 3D Nanoscale Ni - Fe Gyroid Networks*, *Nano Lett.* **20**, 3642 (2020))。今回その磁気的性質を計算機実験にて再現し、その磁気構造を可視化することを目的とした。計算機実験には統計力学の相転移現象を扱うモデルであるイジング模型と実際の強磁性を確認できるハイゼンベルグモデルのモンテカルロ法を用いて、ジャイロイドの複雑な磁気構造を解析する。

17-1-032-0323 機械学習を用いた 2 次元イジングモデルの相画像からの温度推定

顔認識や自動運転など、昨今 AI を活用した技術が注目されている。中でも画像認識分野の発展は目覚ましく、統計物理の分野における転用も研究され始めている。そこで本研究では、画像分類技術を応用して 2 次元イジングモデルの各温度における相画像の傾向を学習させ、高精度での温度推定を目的とした。手法は温度別 2 次元イジングモデルの相画像大量に作成し、学習用と検証用にランダムに分類した。学習用データは google 社の「Tensor Flow」と呼ばれる AI ライブラリで作成した未学習状態の AI に、温度と共に画像を読み込ませた。その後、検証用データを用いて学習程度を確認した。その結果、一定の成果及び課題点が浮かび上がってきたためここに報告する。

17-1-032-0384 情報熱力学から熱力学第二法則の一般化

本研究では情報論と熱力学の分野を融合した情報熱力学を題材にしている。特に研究内容は情報熱力学の視点より熱力学第二法則を一般化するということを目標としている。1 章では情報熱力学の基礎であるシャノンエントロピーを説明する。2 章ではマクスウェルの悪魔問題の思考実験の一種であるシラードエンジンを紹介する。3 章では非平衡統計力学において重要な関係式であるジャルジャンスキー等式を通して、デーモンが熱ゆらぎのレベルで測定とフィードバックを行うデバイスであると理解する。また、4 章ではマクスウェルのデーモン問題を解決されるとされてきたランダウアの原理を考えることで情報論と熱力学の関係を論じる。その応用として 5 章では現代的な情報熱力学の視点でどのようにデーモンのパラドックスが解決されるのか、測定とフィードバックを考えることで新たな熱力学第二法則の一般化を論じる。

E 班

量子制御研究室

17-1-032-0368 NMR 装置の自動制御

NMR とは、磁場中の原子核が外部から与えられた高周波磁場と共鳴をおこす現象です。物質内部の性質や電子状態を調べる手段として利用され、また MRI の基礎でもあります。さらに NMR を応用した量子コンピュータも実現されています。本研究では、このような NMR 装置を Python のプログラムを用いて自動制御し、実験におけるさまざまな手間を省くことを目的としました。自動化をすることで数時間～数日に渡るような長時間においての連続したデータの記録が可能になり、データの解析処理をデータの取得と同時にを行うようにすることで結果の確認もすぐに行えます。さらに解析途中のデータや試行回数の表示を行うことで、任意の時間に実験の進行状況の確認ができるよう利便性も考慮しました。

17-1-032-0303 モーション・キャプチャー

本研究では、3次元空間のデータを取得する実験装置を開発した。3次元データを取得することができれば、様々な運動の軌跡を再現することができるため様々な物理実験に応用ができる。3次元空間のデータを取得する機器は一般には高価である。そこで、本研究では広く普及しているゲームマシン用のセンサーを用いることにした。本研究で用いたセンサーは Xbox360 用の Kinect である。Microsoft 社によって Kinect を PC に接続するための「Kinect for Windows SDK」というドライバも公開されている。このセンサーを Processing を用いた方法と、C++ と OpenCV というライブラリを用いた方法で、3次元データを取得するプログラムを開発した。この論文では Kinect の測定原理と開発手順についてまとめた。

17-1-032-0316 3次元磁場測定器の製作

本装置は磁性流体の磁場に対する効果を測定することを目指して作成した。この装置は 3 プリンターを改造したもので磁場センサを空間的にスキャンすることで 3 次元的な磁場の測定を行う。自動制御することでホール素子と測定対象物との角度、距離などを正確に決められるので測定の精度を上げることができる。センサの 3 次元的な制御は Arduino にプログラムを書き込んで行う。使用するセンサはホール素子を用いる。CNC 用の命令コードである G コードを PC に送り 3 D プリンターを制御することや磁気センサによる磁場の測定を行うことはできたが、同時に制御して実際の測定を行うことはできていない。今回は金属部品を極力使っていない 3 D プリンターを改造した。非金属性の部品を多くすれば磁場に与える影響を少なくできるからである。

17-1-032-0328 LEGO Mindstorms による XY ステージの自動制御

「LEGO Mindstorms EV3」と呼ばれるプログラミング可能なロボット製作キットを用いて XY ステージを自動制御できる装置を作製した。XY ステージとは、2 次元的に位置決めを行うことができるステージのことである。位置決めを高精度で行うことができるため、設計や加工、測定など機械的処理で広く使用されている。また、3D 磁気センサーとも組み合わせ、任意の点で磁場の測定を行う装置に改造した。ほとんどの部品はプラスチックでできているため、磁場に与える影響を最小限にすることができ、磁場の空間分布を精密に測定できると期待できる。

素粒子論・重力理論研究室

17-1-032-0371 素粒子の標準模型から SU(5) 大統一理論へ

現在、素粒子物理学において電磁相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用の 3 つの相互作用を記述する標準模型が存在する。高エネルギー加速器を使用した素粒子の実験結果は、標準模型からの予言と一致している。しかし、標準模型では質量がゼロだと仮定しているニュートリノに質量があることを示唆する実験結果が報告されている。標準模型を超える物理の存在を示す結果がさらに得られる可能性が十分にある。その一つが大統一理論という 3 つの相互作用を統一する理論である。大統一理論は標準模型を超える理論だが、標準模型を基本として発展させた理論である。そこで、この論文では標準模型はどういった理論であるか、それから大統一理論の一つである SU(5) 大統一理論について述べる。さらに、SU(5) 大統一理論で見られる陽子崩壊について述べる。

17-1-032-0369 素粒子の標準模型、大統一理論と陽子崩壊

この卒業論文では、卒業研究で扱った大統一理論についてまとめる。素粒子の標準模型は重力を除いた 3 つの相互作用を記述する理論である。しかし、標準模型では電荷の量子化を説明することができない。また、ニュートリノ振動の実験によりニュートリノには質量があることがわかったが、標準模型には右巻きのニュートリノを含めておらず、ニュートリノの質量は 0 になっている。一方、標準模型が異なるけれども同じようなゲージ理論で記述されているという事実から、それらが高いエネルギーで統一されるとする大統一理論を考えることが自然である。この場合、電荷の量子化を説明することが出来る。しかし、大統一理論は陽子崩壊を予言するので、それが実験事実と矛盾しないようにしなければならない。この論文では、ニュートリノに質量を持たせつつ、これらの点が大統一理論でどのように実現されるかについて、SU(5)、SO(10) のゲージ群の場合に考える。

17-1-032-0311 素粒子の標準模型と超対称性理論

素粒子の標準模型は素粒子の相互作用を記述する模型である。一方で超対称性理論はさらに高いエネルギーの理論の説明ができたり、ダークマターの候補を含むなど魅力的な点が多い理論である。超対称性とはスピンの半奇数のフェルミオンとスピンの整数のボソンを関係づける対称性である。素粒子の標準模型では超対称性や超対称性大統一理論を述べた上でソフトに破れる超対称理論のラグランジアンを構成する一般的な方法を最小超対称性標準模型 (MSSM) で適用する。その中でスーパーポテンシャルと超対称相互作用

や R-parity と呼ばれる新たな対称性を課すことでどうなるか、MSSM のソフトな SUSY の破れ、MSSM でのパラメーターがくりこみによってどのように発展していくのかを述べる。

16-1-032-0356 素粒子の標準模型と弦理論

素粒子の相互作用を記述する理論として電弱理論と QCD を含む標準模型がある。この標準模型は量子論であるが、重力を含んでいない。重力の理論として確立しているものは Einstein の一般相対性理論であるが、古典論であり量子論としては困難がある。一方、重力の量子論として超弦理論という有力な候補がある。これは全ての素粒子が弦からできているという仮説であり、基本的な微視的な弦の特定の振動モードとして、基本的な弦の振動モードそれぞれを、既知の種類粒子と見なすという理論である。この論文では超弦理論がどういったことを目的としている理論なのかを紹介する。本論文では弦理論の基本的なボソンの弦の運動方程式を組み立て量子化を行う。その後、相対論的な量子弦の開弦と閉弦の状態について議論する。

素粒子実験研究室

17-1-032-0383 Python による中学物理分野の電子教材と、電子教材を用いる授業計画の作成

本研究では中学校物理「斜面を下る物体の運動」の電子教材を、Python を用いて作成した。この授業では、速さや移動距離と時間との関係、速さや移動距離と斜面の角度の関係などを定性的に捉え、自分の言葉で表現する力を身につけることが重要である。しかし、現状ではグループ毎に記録タイマーで実験を行い、テープを貼り付けたグラフで考察やまとめを行っているため、物体の動きとグラフを同時に確認することができず、速さ、移動距離、斜面角度、時間の関係がイメージしにくい。そこでアニメーション化し、速さ、移動距離、角度、時間の関係をリアルタイムに表示できる電子教材を作成した。「高さ」「斜面角度」「打点間隔」「表示させるスクリーン」「グラフの色」を任意に変えられるため、課題把握、予想、実験代用、考察、まとめなど授業のどのプロセスでも活用できる。また、視覚的であり、条件設定が明確であり、何回でも繰り返せるため多様な生徒にも対応できる。

16-1-032-0357 GEM を用いたガス検出器での電子増幅率の評価

本研究室ではガスを用いた飛跡検出器の電子増幅機構に GEM を用いている。GEM によって電離電子を電気信号として十分に検出できる数まで増幅させることによって荷電粒子の飛跡を 2 次元位置情報として読み出す。より正確に荷電粒子の飛跡を検出するには GEM の特性を詳しく理解することが不可欠である。そこで本研究では GEM の特性の一つである増幅率が、増幅電子の初期座標と GEM の孔半径、ピッチ間隔を変えることによってどのように変化するかを GEM のモデリングを行う Gmsh、電場計算を行う Elmer、電子増幅のシミュレーションを実行する Garfield++ の 3 つのソフトウェアを用いたシミュレーションによって評価した。結果、ピッチを固定にした時の開口率を大きくすればするほど電子の増幅率は減少し、電子の初期座標や GEM のピッチ間隔に依存せず、GEM の半径に依存することが分かった。

17-1-032-0309 Double GEM における陽イオンの荷電粒子検出部侵入割合の評価

ガスを用いた粒子検出器の電子増幅機構の一種に GEM がある。電子増幅機構における問題点として、イオンフィードバックと呼ばれるものがある。これはガス増幅の際に電子と対になって発生する陽イオンが荷電粒子の検出部に侵入することによって電場を乱したり、新たに発生した電離電子を吸収してしまい、検出器の位置分解能や増幅率を低下させてしまう現象である。本研究は GEM を 2 枚重ねた検出器において上下の GEM の孔位置をずらすことによりイオンフィードバックがどれほど抑制できるのかを Garfield++ を用いたシミュレーションで評価した。結果、ずれなしの場合と $70\mu\text{m}$ ずれの場合にはイオンフィードバックの抑制が見られず、 $35\mu\text{m}$ ずれの場合には他の 2 つより抑制された。しかし、明確な差であるとは認められないので他の工夫が必要であると考えられる。