

平成30年度近畿大学工学部理学科物理学コース
卒業研究発表会

平成31年2月7日(木) 09:00 ~ 17:40

プログラム

08:55 31号館 801教室 全員集合
09:00~09:05 開会の辞：加藤先生

31号館 801教室

- 9:05~10:29 午前の部 1 (座長：堂寺先生)
-01 固体電子物理研究室 (増井：6名)
(10:29~10:40 休憩)
- 10:40~12:04 午前の部 2 (座長：近藤先生)
-02 物性理論研究室 (笠松：6名)
(12:04~13:30 休憩)
- 13:30~14:54 午後の部 1 (座長：笠松先生)
-03 ソフトマター物理学研究室 (堂寺：2名)
-04 量子制御研究室 (近藤：4名)
(14:54~15:10 休憩)
- 15:10~17:02 午後の部 2 (座長：段下先生)
-06 凝縮系物理学研究室 (松居：8名)

31号館 802教室

- 9:05~10:29 午前の部 1 (座長：石橋先生)
-01 宇宙論研究室 (井上：5名)
(10:29~10:40 休憩)
- 10:40~12:18 午前の部 2 (座長：矢野先生)
-02 一般相対論・宇宙論研究室 (石橋：7名)
(12:18~13:30 休憩)
- 13:30~15:08 午後の部 1 (座長：井上先生)
-03 素粒子論・重力理論研究室 (太田：1名)
-04 素粒子実験研究室 (加藤：2名)
-05 素粒子・宇宙物理学研究室 (千川：4名)
(15:08~15:30 休憩)
- 15:30~16:40 午後の部 2 (座長：西山先生)
-06 生物物理学研究室 (矢野：5名)

17:10 - 17:20 総評：松居先生

17:20 閉会の辞：加藤先生

- 発表時間 10分, 質疑応答 3分, 交代 1分
- ベルは発表経過時間 8分, 10分, 13分。ベル係は発表研究室の次の研究室が担当
(発表最後の研究室のベルは発表最初の研究室が担当)。
- 全3, 4年生及び教員は8時55分までに801教室に集合。3, 4年は全ての研究室の発表をきくこと。
- 17:20~ 卒業研究判定会議

卒業研究発表祝賀会 18:00 ~ 20:00 カフェテリア・ノベンバー
(11月ホール地下)

- 18:00 開会の辞
乾杯: 太田先生
歓談
- 20:00 閉会の辞

固体電子物理研究室

YBCOの焼成温度によるZn置換位置の検証

高温超伝導体 YBCO の Cu サイトには、CuO₂ 面と CuO 鎖があり、Zn 原子が CuO₂ 面の Cu と置換することで転移温度 T_c が下がる。Zn は、CuO₂ 面内に優先で置換されるが、先行研究により、焼成温度によって Zn の置換位置が変化するという可能性が指摘されている。そこで、YBCO の焼成温度を変更することで、YBCO の焼成温度と Zn の置換位置の関係の検証を行った。本研究では、焼成温度のパターンを 900 °C、930 °C、950 °C の 3 つに分けて、Zn を 1.50 % から 2.25 % まで 0.25 % ずつ置換量を増加した YBCO を作成し、粉末 X 線回折から試料の評価、交流磁化率の測定から T_c の決定を行った。結果として、1.50 % において焼成温度 900 °C での試料が他の焼成温度での試料と比べて T_c 抑制の効果が強いという結果が得られた。限定的ではあるが、焼成温度によって Zn の置換位置が変化することは確かなようだ。

YBCOにおけるNiとZnの同時置換効果

高温超伝導体である YBCO 中の Cu に Ni と Zn を同時置換することによる超伝導転移温度 T_c の変化を見る。Ni と Zn をそれぞれ Cu に置換すると YBCO の T_c は下がることが確認されている。ここで、Ni と Zn は Cu の前後の原子番号であることから、Ni と Zn を合わせた電子状態は Cu 2 個分の電子状態とほぼ同等となると考えられる。このことから、YBCO に Ni の置換割合を変えながら、Ni と Zn を同時置換した試料を作成し、試料ごとに交流磁化率測定を行い、T_c を決定し、その変化を見た。また、試料作成が期待通りなされているかを粉末 X 線構造解析によって確かめた。そして、既知の Ni 単体での置換効果による T_c の降下の直線と得られた T_c の値をグラフにプロットすると、低濃度範囲でその直線から外れて単調減少ではないという結果を示した。また、粉末 X 線構造解析において、試料は期待通り作成できていると確認した。

銅酸化物高温超伝導体 YBCO の Sr 置換効果

銅酸化物高温超伝導体の転移温度は様々で、超伝導は CuO₂ 面で起こることから CuO₂ 面内の元素を置換することで転移温度を変化させようとする研究がされてきた。しかし、CuO₂ 面外の元素を置換しても転移温度が下がる。先行研究より、Y サイトのみに Sr を置換させることはできず、Ba サイトと同時に置換させることは可能だとわかった。本研究では、YBCO への Sr 置換効果に対する理解を深めるために、先行研究で得られたデータを補う形で試料を作製し、Y サイトへの Sr 置換量を最大にするような Ba サイトへの Sr 置換量を見つけることを目的とした。試料を作製する際、Ba サイトへの置換量は 25 % に固定し、Y サイトへの置換量を 10 % から 50 % まで、10 % ずつ変化させて試料を作成した。作成した Y サイトへの Sr 置換量が 30 % 以上の試料については不純物が多く見られたので、Ba サイトへの置換量よりも多く Y サイトへ置換することはできないと考えられる。

第一原理計算を用いた DV-X α 法による電子状態計算

DV-X α 法とは、第一原理計算法に分類される電子状態計算である。X α 法とは、スレーターにより提唱された方法で、ハートリー・フォック法で計算の複雑な交換ポテンシャルの項を電子密度の 1/3 乗に比例する簡単な式で近似することが大きな特徴である。この手法を用いることで元素の種類によらず同精度で計算を行え、あらゆる元素を取り扱うこともできる。また、その特徴から他の第一原理計算より計算時間が短く、大きな分子や結晶の一部を切り出したようなクラスターについて計算を行える。本研究では、BaTiO₃ のクラスターモデルを作成し、Ti を Ni, Cu, Zn に置き換え電子状態計算を行うことで電子状態にどのような差異が出てくるのか、エネルギー準位図を用いて確認を行った。

回折格子方程式に基づく透過型分光器製作について

本研究ではより安く、より簡単ながらも高い性能を誇る分光器を作ることをテーマとした。まず、分光器の要となる回折格子には入手が用意な CD-R を用いた。CD-R は 1.6 μ m のトラックピッチを持つので、約 650 本/mm の回折格子として利用することが可能となる。その回折格子を用い、入射光を垂直入射させることが可能な簡易分光器の設計・製作を行った。製作した分光器を用い、研究室室内にある蛍光灯とネオンランプの分光を行った。これらのランプの光には、高いエネルギー状態にある原子が低いエネルギーへ遷移するときに放つ原子固有の光スペクトルが含まれている。得られた画像を「すばる画像解析ソフト Makali 'i II」を用いて輝線へと変換し、波長の照合を行った。そして得られた波長のグラフを元に、作成した簡易分光器の分解能の導出を行い、簡易分光器の性能の評価及び性能向上のための考察を行う。

反射型簡易分光器の製作と原子スペクトルの観測

分光器とは、一般には光の電磁波スペクトルを測定する光学機器の総称である。今回は CD-R、DVD-R を回折格子として使用した反射型分光器を製作し、デジタルカメラと携帯カメラでスペクトル画像を撮影した。蛍光灯を分光して得られる水銀の輝線スペクトルや電源のスイッチなどに使用されているネオンランプのスペクトルの撮影、さらにハロゲンランプのスペクトルを撮影し、波長による輝度の値がプランクの法則と実際に一致するのかを検証した。また、観測した水銀の輝線スペクトルと数値的に計算して導出した数値から、製作した分光器の波長分解能を CD-R、DVD-R で評価、光源の間に半透明のビニールを挟み、デジタルカメラと携帯のカメラの分光感度を測定した。

物性理論研究室

STIRAPによる遷移効率のシミュレーション

近年、半導体技術の発展によって半導体内にナノスケールポテンシャル井戸を形成し、その中に電子を閉じ込めることが可能となった。この構造は量子ドットと呼ばれる。量子ドットを用いた量子計算では、2つのドットを用意しどちらが占有されるかによって状態を区別する電荷量子ビット、また電子のスピンを利用し、長いコヒーレンス時間を実現したスピン量子ビットが用いられている。また、量子論により原子と光の相互作用の解明が進み、レーザー技術が進歩したことによって、光学的遷移を引き起こすことが出来る。量子ドットにおいても同様に光学的遷移を引き起こし、量子ビットを移動させる実験が活発に行われている。様々な方法での光学的遷移があるが、本論文では、準位選択性もよく、実験的な時間制御についても困難がほとんどないことが知られている誘導ラマン断熱過程 (STIRAP) を用いて量子ビットの遷移について考察する。

Andreev 反射の理論

Andreev 反射とは半導体と超伝導体の結合を行い、電流を流した際に結合界面で起こる物理現象であり、非常に興味深いものである。通常、Andreev 反射の理論は理想的な障壁を仮定して解析的に計算するが、より一般的な Andreev 反射の問題を取り扱うためには Bogoliubov-de Gennes (BdG) 方程式の数値計算が必要である。この数値計算を行うために、超伝導の平均場近似から BCS Hamiltonian を導き、対角化を行うことで BdG 方程式を導き、これらの理論を理解した上で、Andreev 反射という現象の解釈を行なった。本研究では、一様なギャップに対して BdG 方程式の数値計算を行い、既知の結果であるペアポテンシャルの大きさと温度依存性を再現することを試みることを行い、この計算の結果や考察を述べる。

非一様な 2 次元光格子中の冷却原子気体における超流動-Mott 絶縁体転移のダイナミクス

本研究では Bose-Hubbard Model を用いて Mott 絶縁相から超流動相への相変化を引き起こし、その後の非平衡ダイナミクスの理論的解析を行う。Gutzwiller 方程式の on-site 相互作用で無次元化したトンネリング項に線形の時間依存を持たせ急激な変化を考える。また一様系において急激な相転移のダイナミクスを扱う理論として "Kibble-Zurek Mechanism" が知られている。この理論により、Mott 絶縁相から超流動相へ急激に相転移させることで系に任意の位相を持ったドメインが形成し、このドメインどうしの位相のミスマッチから生じる位相欠陥の密度がクエンチ時間に対してべき乗則に従うということが知られている。今回は系に調和振動子トラップポテンシャルを導入し、非一様系での "Kibble-Zurek Mechanism" について数値シミュレーションを行った。結果とともに議論する。

光格子中の一次元ボース気体におけるダークソリトンの準古典ダイナミクス

一次元ボース気体に光格子を印加すると、古典領域でのダークソリトンの性質が変化することが知られている。具体的には、ソリトンの位相キックが格子点上にある場合と格子接合点上にある場合とで動的安定性に顕著な違いが出る。しかし、量子ゆらぎが強い領域での解析によると、その安定性は位相キックの位置に依存しない。このことは、この二つの領域の間で、ソリトンの安定性の描像が切り替わることを示唆している。本研究では、切断ウィグナー近似法を用いて、光格子中のダークソリトンのダイナミクスを準古典領域において数値的に解析する。古典領域から徐々に量子ゆらぎを変化させることで、量子ゆらぎによってソリトンの安定性の描像が切り替わることを明らかにする。この結果から、2 種のソリトンのダイナミクスの違いに着目することで、不安定性が古典ゆらぎ由来なのか量子ゆらぎ由来なのかを区別できるという提案を行う。

相分離した 2 成分 BEC の界面における Kelvin-Helmholtz 不安定性の解析

流体力学分野の中で Kelvin-Helmholtz 不安定性 (KHI) という現象が長年研究されている。KHI は一様な重力下で密度と速度の異なる二つの流体間に起こる不安定性として知られており、海の波や旗のはためき、雲の渦巻き模様などの身近な現象の要因であると考えられている。KHI の理論はもともと完全流体に対して論じられており、動的 KHI を実現できる系として、冷却原子気体 2 成分 Bose-Einstein 凝縮体 (BEC) が提案されている。本研究では、相分離した 2 成分 BEC に相対速度をもたせ KHI のシミュレーションを行う。その中で、相対速度や外部ポテンシャルの変化による KHI のふるまいの変化を観察し理論的な解釈に結びつける。

2 次元光格子中のボース凝縮体のソリトンと渦の生成

ボース凝縮体の超流動状態の安定性を調べるために、外部ポテンシャル障壁が規則的に配列し、エネルギー極小が多重連結した 2 次元光格子 (足つぼマット型) 中にボース凝縮体を流し込む状況を考える。その際に、ボース凝縮体にソリトンや量子渦が生成され、摩擦が生じることにより超流動状態が崩壊することが知られている。まず、本研究の事前研究として、1 次元光格子 (洗濯板型) で行われた先行研究を数値実験し、同様の結果が出るかを確認した。本研究では、2 次元光格子にボース凝縮体を様々な速度で流し込んだ時のソリトンや量子渦の生成から消滅までを観測し、量子渦が生成され、超流動性が崩壊するためのボース凝縮体の速度の境界を測定した。また、2 次元光格子のポテンシャル障壁の大きさを増加させ、量子渦が生成されるための速度の境界の変化を測定した。本発表では、その結果と考察を述べる。

ソフトマター物理学研究室

高分子ミセルの構造形成シミュレーション

お互いに混ざりあわない 2 つの高分子から成る AB ブロック共重合体は A と B の長さの比に応じてラメラ、ジャイロイド、シリンダー、球などのマイクロ相分離構造を形成することが知られている。これらのマイクロ相分離構造の形成に焦点を置いて開発された格子高分子シミュレーション法が「対角線法」である。この「対角線法」を用いたシミュレーション実験を行うことで、どのような相分離構造ができるのかを理解し、形成条件をまとめる。本研究の最終目標としてはダイヤモンド構造の形成条件の発見である。目標を達成することはできなかったが、シミュレーションボックスの大きさと共重合体の長さを変えていき、相分離構造が球状になる条件を一般化することでダイヤモンド構造を形成する条件の足掛かりをつかむことを目標とした。

非周期的タイリングの拡張について

本研究室で発見された青銅比タイリングは自己相似性を持っており、小正三角形、大正三角形、長方形の 3 種類のタイルで構成される。さらに、このタイリングはタイル数を変化させることにより、異なる自己相似性を持つ非周期的タイリングを無限に構築できることが分かっている。本研究では、金属比タイリングに注目し、黄金比・白銀比・青銅比と呼ばれる金属比に関連する準周期タイリングについて学んだ。実際には、それぞれ金属比に関連して平面を充填する 10 回対称性を持つ「ペンローズ・タイリング」、8 回対称性を持つ「アンマン-ピーンカー・タイリング」、6 回対称性を持つ「青銅比タイリング」を学んだ。発表では、青銅比タイリングの拡張と同様に黄金比も様々な規則で拡張できると考え、新しいタイリングの生成規則について考察した。これらの結果を報告する。

量子制御研究室

プロジェクション・マッピングを使った物理学実験

Processing というビジュアルデザイン用のプログラミング言語を使い、写っているものをトラッキングすると同時に、それにリアルタイムで情報をプロジェクションマッピングする装置の製作を行った。力学実験にこの技術を取り入れて、速度などの情報をプロジェクションすると実験を理解する助けになると期待される。速度や加速度を二物体まで色を識別しトラッキングする事で PC 画面上にベクトルを表示する事に成功した。画面上だけでなく映写することにも成功はしたが、映写機とカメラを正しい位置関係で設置するのが難しく映像にズレが生じ易い。また、映像にラグが発生してしまいベクトルの表示が追いつかず速度の速い物体には使えないといった点で改善が必要である。映写機とカメラの設置の問題はズーム付きのカメラを導入することによって、また、ラグについてはプログラムの高速化によって改善できると考えている。

電子回路の測定実験の改良

USB/WiFi 接続可能な多機能オシロスコープ「OpenScope MZ」を用いた学生実験装置を製作した。実験内容はオペアンプを用いた電子回路の周波数特性を測定するというものである。現在使われている実験装置には、オシロスコープ及びファンクションジェネレーターが使われているために、実験装置が大型であり、実験を行うことが可能な場所が限られている。発振器の機能もついたオシロスコープである「OpenScope MZ」と PC を用いることで小型化し、どこであっても大学で行うのと同じ実験を行うことを可能にした。また、従来の実験装置に可搬性を持たせることによって、中学校や高等学校等での出張実験にも使えるため、実験装置の活用機会が増えることが期待される。

フライングディスクの物理学

フライングディスクは回転を加えて投げた際、揚力を生みながら飛行する。これは「角運動量の保存則」による回転する物体の安定性と、ディスクの形状によって生じる上面と下面の圧力の差による結果であり、回転が速ければ速いほどその飛行は安定する。さらに飛行機の翼とフライングディスクの形状に着目すると、フライングディスクの方が境界層の剥離による乱流がもたらす抗力を大きく受けていることがわかる。通常フライングディスクは人から人へ投げられキャッチしやすい形状を優先している。より遠くへ飛ばすことを主目的としたディスクでは抗力を減らす為、断面が飛行機の翼の形に近く、慣性モーメントを大きく保ったままなるべく質量を減らしたドーナツ型のディスクが良いと考えられる。このアイデアに至ったのち、調べてみると同じアイデアを思いついた人が既に存在し、実際に性能が良いモノが作られていた。

波形変換装置の作成

最近の測定では物理量を電気信号に変換してから測定することがほとんどである。例えば、野球などで使われるスピードガンはボールに電磁波を照射、ドップラー効果を利用してボールの速度を電磁波の周波数に変換、跳ね返ってきた電磁波を受信し電気信号に変換して測定している。その際にはノイズ抑制のために電子回路による波形変換装置が必要である。今回はノイズ抑制とは異なるが、入力された波形を別の波形に変換して出力する波形変換装置の作成である。具体的にはエレキギターのエフェクターの作成を行う。また、電子回路にはアナログの電子回路方式とデジタルの電子回路方式がある。それぞれの特徴とメリット、デメリットについても述べる。最後に、今回作っている電子回路によって得られる効果を説明する。

凝縮系物理学研究室

長期増強 (LTP) とホップフィールドモデル

人間が生活していく上で、様々なことを記憶したり学習することが欠かせない。本研究の目的は、脳内の学習、記憶、想起といった一連の流れを力学的モデルを用いて理解することである。結果として以下のことを理解できた。(1) i 番目と j 番目を結ぶシナプスが示す長期増強 (LTP) という実験事実により、シナプス結合強度 J_{ij} が Hebb 則を満たすこと。(J_{ij} に学習したパターンが埋め込まれることを表す)。(2) 本来変数 $s_i = 0, 1$ で表していたニューロンの発火・安定状態を磁性体のイジングスピン変数 $S_i = \pm 1$ に変換して、磁性体のスピンモデルと対比させられること (ホップフィールドモデル)(3) S_i が時間とともに学習したパターンに収束する (想起する) こと。(4) 新しい記憶パターンの分だけ J_{ij} を変化させることで学習のモデルへ展開できること。

第四の基本素子メモリストと Hodgking-Huxley モデル

人の脳は、約 1000 億のニューロンが互いにシナプス結合したネットワークである。各ニューロンは発火状態と安定状態を繰り返す。その振る舞いを抵抗、コンデンサを使って電気回路的に記述し、成功を収めたのが Hodgking-Huxley(HH) モデルである。本研究室ではその一部を「第四の基本素子」として興味を持たれているメモリスト (未完成) で置き換え、より単純化した脳神経の完全電気回路モデル (HHM モデル) を提案し、調べてきた。本研究では、これを引き継ぎ、より HH モデルの結果に近い結果を与える HHM の構築を試みる。具体的には HH モデルの各イオンチャンネルの抵抗部分をメモリストで置き換え、キルヒホッフの法則の数値シミュレーションを行い、脳型素子として最適なメモリストの可能性を探る。

ディープラーニングの考え方と応用例

計算機の高速度化、コードのオープンソース化、ビックデータの取得によって、予測、統計処理、など日常レベルで容易に活用できる AI としてディープラーニング (DL 深層学習) を利用できる時代になった。本研究の目的の一つ目はまず DL の考え方を数理的に正確に理解することである。これは将来 DL よりも進化したアルゴリズムを提案・理解するために必要である。発表では AI の基本的な枠組みである多層ニューラルネット、時間発展 (学習、update) の標準的規則である勾配降下法、DL において実装される誤差逆伝播法 (勾配降下法の改善版) を説明する。本研究の 2 番目の目的は DL を実際に使用・体験することである。これは使用者の立場から今後の発展に向けて提言するためのサポートになる。具体例として Google が開発・公開している TensorFlow を用いて競馬の予想を行い、その有用性について考察する。

意識の在り処を探す試みと統合情報理論

「脳の時代」と言われてから久しいが、脳についての研究が多面的・精力的に進められている。本研究では、特に「意識は脳のどこに宿るのか」という問題に着目し、その問題に深く切り込んだ理論と実験を元にして、二つの側面から意識の在り処について論ずる。(1) Tononi は、多くの情報が統合された場所に意識が宿ると考え、意識の統合情報理論 (IIT) を展開した。IIT の基本となるいくつかの公理を通して、その特徴を理解する。(2) 意識の在り処を探すうえで特徴的な現象の一つに両眼視野闘争という知覚現象がある。この現象を利用した Logothetis や Tong らの猿や人間を使った実験を紹介・解釈する。以上から意識の在り処に関する我々の理解はどのような道筋で進むべきなのかを考える。

意識の発現に向けて：Z(2) ゲージニューラルネットワークでの統合情報量

意識についての Tononi の統合情報理論 (IIT) は、意識強度の指標として統合情報量 Φ を定義している。 Φ が評価できれば意識の発現条件が求められる。 Φ はエンタングル・エントロピーに似た量で、複雑で厳密な計算は難しい。本研究では、(1) 情報量としてシステムの熱力学的エントロピー、(2) 統合化の指標として磁化等の相転移における秩序変数、を選び、これら二つの積を Φ の近似値として、物理学的表現 Φ_p を提案し、その妥当性を調べる。中間発表では例として平均場理論を用いて 2D イジングモデルの Φ_p を計算した。本研究では、続きとして比熱積分によるエントロピーの評価、秩序変数の近似としての内部エネルギーの妥当性を調べ、Z(2) ゲージニューラルネットワークモデル、Z(2) 右脳左脳ゲージモデルの Φ_p を評価し、意識の発現を論じる。

CP¹+U(1) 格子ゲージ理論： スピン、ビット、ニューロンの量子ネットワーク

時代は AI、深層学習、量子コンピュータなど、情報系のキーワードで華やかである。また、脳機能についての研究や伝統的な凝縮系での量子シミュレーションの研究も進歩が著しい。本研究ではまず超伝導の BCS モデルと 2 次相転移の Landau-Ginzburg 理論の関係を振り返り、続いて Heisenberg spin モデルの研究で導入された CP¹+U(1) 格子ゲージ理論を紹介する。さらにこの理論が、スピン、ビット、ニューロンなどの 2 状態素子が U(1) ゲージ場を通して相互作用する量子系の一般的なモデルであることを説明する。あわせて先行研究で得られたこの理論の相構造が量子スピン系、量子ビット系、量子ニューラルネットワークのモデルとして何を示唆するかを論ずる。

特異値分解とスケール分解

特異値分解は行列 A の積 $A^t A$ の固有値 $\lambda_n (\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq 0)$ の大きさの順に A を $A = \sum_n \sqrt{\lambda_n} U_n V_n^t$ とスペクトル分解するものである。計算機科学の分野では以前から主成分解析という別名で使われてきた。また、近年、統計物理学でのスケール分解に対する情報理論的なアプローチとしても注目されている。具体的には特異値 λ_n の分布に対するエントロピーの振る舞いを使って、相転移点上でのスケール分布のフラクタル構造などの系の特徴を調べる。また、展開指数 $n (= 1, 2, \dots)$ と局在長の相関も指摘されている。本研究では、特異値分解法をより深く理解するために、2次元格子イジングモデルを例にシミュレーションを行い、厳密解と比較する。また、局在-非局在転移など、他の話題への応用の可能性についても言及する。

量子場脳理論： 3+1 次元 CP¹+U(1) 格子ゲージ理論の時間発展

当研究室ではニューラルネットワークを使用して、個々の脳細胞の動作からは想像出来ない脳細胞集団独自の振る舞いを統計力学などの手法を用いて解析し、脳の全体的な高次機能である学習・想起能力の発現などを物理学的に理解しようとしてきた。特に脳の量子モデルについては、梅沢・高橋らや治部・保江らにより提案された量子場脳理論をもとに、電磁相互作用を持つ局所 U(1) ゲージ対称性を考慮した 3+1 次元 CP¹+U(1) 格子ゲージ理論が提案され、その平衡状態での相構造と記憶・学習機能との相関が指摘された。本研究はこのモデルの実時間発展を調べることを目的とし、半古典近似であるグロス・ピタエフスキー (GP) 方程式を導く。発表では簡単な例として 1 次元空間格子上の CP¹ + U(1) 格子ゲージ理論の時間発展を GP 方程式により解析する。

宇宙論研究室

宇宙の未来 -ビッグリップ-

20世紀初頭まで、『宇宙に終焉というものはなく、宇宙は膨大な時間が経過しても変化することなく存在し続ける』ということが、物理学者たちの考えの主流であった。このような宇宙モデルは現在、定常宇宙論として一般的に知られている。しかし、ハッブルやルメートルが宇宙の膨張を発見した後、宇宙の起源と終焉に関する研究が注目されるようになった。宇宙初期を記述する理論としては、インフレーション理論があり、宇宙の終焉に関してもいくつかの理論がある。本研究では、宇宙モデルを複数用意し、宇宙の未来を数学的に記述する。本発表では、それらを紹介し、特に「ビッグリップ」と呼ばれる現象について詳しく解説する。

4重像クエーサー MG0414+0534 の連続波解析

MG0414+0534 は、楕円銀河の重力レンズ効果によって4つの像に分裂して見える4重像クエーサーである。またこれは重力レンズ像のフラックス比に異常がある天体として知られ、レンズ天体である楕円銀河中のサブハローの影響が要因の一つであると考えられている。先行研究では、高解像度を持つALMA電波望遠鏡を用いて天体の観測と解析が行われ、レンズ像の近傍に矮小銀河と思われる天体からの弱いシグナルが検出された。本発表ではALMA電波望遠鏡で観測されたMG0414+0534の連続波に対するセルフキャリブレーションによりS/N比を向上させたデータを用いた解析結果について報告する。

直接和法による宇宙論的N体シミュレーション

重力不安定性による非線形構造の形成を解明する手法の1つに、 N 個の質点間に働く重力相互作用を数値的に計算する N 体シミュレーションがある。本研究では、一様球対称重力多体系の時間発展を直接和法で計算し、解析解との比較を行う。粒子を等間隔に配置した場合とランダムに配置した場合でそれぞれ計算し、ランダムに配置した場合の方が理論値からのズレが大きくなるかどうか調べる。初期条件として適切なパラメータの値を与えることが出来れば理論値に近づくであろうと考えられる。本発表では、各パラメータに初期条件として与えた値がどのように計算結果に影響を及ぼすのか調べた結果について報告する。

SISモデルとSIEモデルにおける重力レンズ像のシミュレーション

一般相対論によると重力により天体の周りの時空は歪むので、天体の周辺を通過した光は曲がって進む。その結果、天体がレンズのような働きをするため、これを重力レンズと呼ぶ。観測された重力レンズから天体の実際の位置や光学的観測にかからないダークマターの質量分布を解明することができる。本研究では、重力レンズ現象による像の位置を二次元平面に再現するプログラムを使用し、様々な条件下での像の位置を測定する。銀河を構成する各粒子が銀河の重力に束縛され、速度分散が一様で球対称な特異等温球(SIS)モデルと粒子の分布が楕円対称である特異等温楕円体(SIE)を考える。本発表では、様々なパラメーターを変化させた時の増光率や、光源とレンズ天体の位置関係によって変化する像の位置について報告する。

重力レンズクエーサーRXJ1131-1231のモデリング

遠方に存在する光源が放った光が銀河などの重力源によって偏向したり増光することを重力レンズ効果という。また、この現象が顕著に現れるとき光源の光は複数の像となって観測される。本研究で用いるRXJ1131-1231は、地球から約60億光年先にある巨大楕円銀河により背景のクエーサーが4重像に分裂して見える重力レンズ天体である。実際の画像と照らし合わせ、ダークマターのサブストラクチャーの必要性について考察した結果について報告する。

重力レンズ天体模型によるデモンストレーション

遠方の恒星や銀河などの光源と観測者の間に大きな重力をもつ天体があった時、光源が発する光がその天体の重力によって曲げられ、複数の像や変形した像が見える現象を重力レンズ現象という。本研究では、3Dプリンターで作成した模型をシリコンで型取りし、その型に樹脂を流し込む方法で、SIS型(特異等温球)、SIE型(特異等温楕円体)、PM型(質点)の3つの模型を製作した。その模型を用いて、光源の位置やレンズ天体と観測者の間の距離を変化させたとき、レンズ像がどのように変化するか調べた結果について報告する。

一般相対論・宇宙論研究室

初期宇宙とインフレーション

ビッグバン宇宙モデルは、宇宙は高温高压の火の玉から始まり、宇宙膨張とともに温度が低くなっていく過程で軽元素が合成されることを説明する、優れた宇宙進化シナリオである。しかし、ビッグバン宇宙モデルにはホライズン問題や平坦性問題などの欠点もある。これらの問題点の解決策として、1980年代初頭に佐藤やゲースらにより提案されたのがインフレーションモデルである。インフレーション宇宙はドジッター時空と同じように指数関数的な加速膨張が起こることが特徴である。本発表では、このドジッター時空的な加速膨張が、スカラー場のポテンシャルエネルギーにより引き起こされるメカニズムと、インフレーションを特徴づけるスローロール・パラメーター、およびその観測による検証可能性について紹介する。

インフレーション理論と重力波

アインシュタインの一般相対性理論に基づいて我々の膨張宇宙を記述する「ビッグバン宇宙モデル」は、これまで様々な宇宙論的観測による検証に耐えた優れた宇宙モデルであり、現在では我々の宇宙を記述する標準モデルとみなされている。しかし、このビッグバン宇宙モデルはホライズン問題、平坦性問題、モノポール問題などの困難を持つ。それらを解決するために提唱されたのが、初期宇宙の急激な加速膨張を表す「インフレーション宇宙モデル」である。このモデルは上記の問題点の解決とともに、物質の密度ゆらぎや重力波の生成をも予言する。今発表では、インフレーション宇宙モデルの基本的機構とモデルを特徴づけるパラメーター、そしてインフレーションによる重力波の生成機構について詳細を解説する。

シュバルツシルトブラックホールについて

我々の宇宙には、数多くのブラックホールが存在すると考えられている。1916年、シュバルツシルトは静的球対称真空な時空の構造を一般相対論から求めた。この解はシュバルツシルト解と呼ばれアインシュタイン方程式の最初の厳密解である。しかし、その解には、発散する点が2つあり、長い間、謎であった。やがて、そのうちの1つの点については座標変換によって発散が解消されることが判明した。本発表では、まず、球対称な時空の計量を一般的に求める。その後、真空解であるシュバルツシルト解を導出する。次に、シュバルツシルト解の発散の問題をクルスカルの方法を用いて解消する。その後、時空図を用いることによりブラックホールの大域構造を明らかにする。さらに星が重力収縮していく様子も時空図で記述する。

球対称星の重力崩壊とブラックホール形成

一般に太陽質量の8倍以上の重さをもつ恒星は、いずれ超新星爆発を起こし中性子星になると考えられる。しかし、中性子星には Tolman-Oppenheimer-Volkoff 方程式から導出される限界質量が存在し、それより重い場合には限りなく重力崩壊し、最終的にブラックホールを形成すると考えられる。本発表では、この限界質量を越える天体が球対称の場合にどのように重力崩壊して行くのかをクルスカール図上で記述する方法を紹介する。特に、重力崩壊をする星の表面から放たれた光信号の観測を想定して、クルスカール図の解説を行うとともに、重力崩壊をする星がどのように収縮をしていくのか、特に地平面を通りすぎた後の星が、星の中心に落ち込んでいく様子について詳しく解説する。

ブラックホール No-hair 定理とバリオン数

「ブラックホールの面積は不変であるか、増大する」ことが示されている。この「ブラックホール面積則」は熱力学第二法則の主張と類似している。また、ブラックホールの面積、質量、および角運動量の変化の間の関係式は、熱力学第一法則と類似していることも知られている。Hawkingらにより1970年代初頭に示された、これらのブラックホール力学の結論は、「ブラックホールは、質量、角運動量、電荷のみで記述され、その他のあらゆる情報は、事象の地平面内に落ち込み、外部から観測されない。」とする「ブラックホールの No-hair 定理」の提案につながった。本発表では、この No-hair 定理の主張に動機づけられて、Bekenstein が1970年代に行ったブラックホール周辺のスカラー場やバリオン数についての先駆的研究を紹介する。

定常ブラックホールはスカラー場およびベクトル場の毛を持てるか

No-hair 定理から、「漸近的平坦な定常ブラックホールは、質量、角運動量、および電荷の3つ以外の物理量を持つことができず、したがって Kerr-Newman ブラックホールに限られる」ことが知られている。しかし、この No-hair 定理の主張は、ブラックホールの周囲が真空もしくは高々電磁場のみの場合に証明されている。では、それ以外の“場”がある場合ではどうだろうか。本発表では、Bekenstein の1970年代初頭の先行研究をもとに、ブラックホールの周囲にスカラー場やベクトル場が存在する場合について考察し、漸近平坦性や事象の地平面での荷電スカラー場やベクトル場の正則性などの条件から、ブラックホールはバリオン数を持つことができないことを証明する。

流体を用いた疑似ブラックホール

ブラックホールは強い重力場を持つため、光すらその内部から脱出できない天体である。だがいかなる波動現象とも無縁の「沈黙の天体」というわけではなく、外部領域では重力波放射やホーキング輻射といった興味深い現象が発生している。こうした現象を宇宙のブラックホールを用いて実験検証するのは困難であるが、もしブラックホールの特徴を物質系で実現できたら実験室で検証することが可能になる。そのため、これまでもブラックホールを流体などで疑似的に構成しようとする様々な理論的及び実験的研究が行われてきた。本発表では、まず遷音速流による疑似ブラックホールの可能性を理論的に確認し、次に疑似ブラックホールを形成する流体として超流動を用いた超流動モデルについて解説する。

素粒子論・重力理論研究室

カー・ブラックホールの性質について

2015年9月14日に人類史上初めて検出されて以来、重力波が注目を集めている。一般相対性理論によれば、質量をもった物体が存在すると、時空に歪みが発生する。さらにその物体が（軸対称ではない）運動をすると、この時空のゆがみが光速で伝わる。これが重力波である。重力波はすべてを貫通し、減衰しないと考えられている。その発生源の一つは、1963年に Kerr Roy が発見した、自転するブラックホール（カー・ブラックホール）ではないかと考えられている。ブラックホールは無毛定理により、質量と角運動量と電荷のみ観測できるとされている。そのうち質量と角運動量をもつものがカー・ブラックホールであるまたそれは記述する Kerr 計量や Einstein 方程式の厳密解である Kerr 解によって表される。本発表では一般相対性理論、Einstein 方程式、Kerr 解の導出過程、そしてその性質について解説する。

素粒子実験研究室

GEM を用いたガス検出器における電子増幅率の評価

GEM(Gas Electron Multiplier) を用いた荷電粒子の飛跡を検出するガス検出器の研究を行っている。ガス飛跡検出器とは、荷電粒子が気体分子と衝突することで発生する電子を読み出し面で読み取り、電離した電子の飛跡を調べる検出器であり、電離した電子の数を増幅させるために GEM を用いている。荷電粒子が気体分子を電離することで発生する電子の増幅率を適切に理解するにはシミュレーションを行い、電子の増幅率を評価する必要がある。そこで本研究では、より適切な電子増幅のシミュレーションを再現するために先行研究で使用したような穴の配列が並行型の GEM モデルではなく、より実機に近い穴の配列が 60 千鳥型の GEM モデルを作成し、増幅させる電子の初期位置座標の高さと増幅した電子の広がりとの関係性に着目して電離電子の振る舞いを評価する。

GEM の有限的な部分における電子の振る舞い

当研究室では、実際に研究室で用いられている GEM のモデルをシミュレーション上で作成し電子増幅の振る舞いを再現することを目的としている。GEM とは、絶縁体を銅箔ではさみ微小間隔で穴をあけた構造で、銅箔間に高電場を発生させることで電子の増幅を可能にしたものである。先行研究では GEM の最小構造モデルを作成し、これをシミュレーション上で繰り返すことで実験を行ってきたが、当研究は穴を 20×20 個あけた構造の GEM モデルを作成することでこれまで観測できなかった GEM の有限的な部分、つまり GEM の端の穴での電子の振る舞いに着目する。シミュレーションに用いたソフトウェアは、有限要素法を用いてモデルを作成する Gmsh、電場計算ソフトである Elmer、シミュレーションを行う Garfield++ の 3 つである。

素粒子・宇宙物理学研究室

AMC 用 2 本アンテナによる受信電波強度 (XBee S2C)

CTA(Cherenkov Telescope Array) 計画とは高エネルギーガンマ線を放出する天体を観測する計画である。大口徑望遠鏡 (Large Sized Telescope) というチェレンコフ望遠鏡の中で最も大きい望遠鏡を CTA 計画では使用している。望遠鏡の鏡は 1.51[m] の正六角形の分割鏡 198 枚から構成されている。LST は瞬発的な現象に対応するために 20 秒に 180 回転する必要がある。しかし大きく重量も大きいため、構造体にズレが生じやすくなった。チェレンコフ光を確実に光電子倍增管に集め、精度の高いデータを得るためには分割鏡のズレを補正する必要がある。このズレが原因で測定精度を落とすような様々な問題が発生する。ズレを補正するシステムが能動的分割鏡制御システム (Active Mirror Control、AMC) である。AMC は無線で分割鏡を操作する。この無線は現在アンテナ 1 本で行われているが、本研究では 2 本に増やすことで 1 本アンテナよりも精度の高い測定データを得られると考え、実験を行い、評価した。

AMC 用 2 本アンテナによる受信電波強度 (XBee Pro S2C)

CTA 計画で使われている大口徑望遠鏡 LST には 198 枚もの分割鏡が使われ、この 198 枚の分割鏡で大気中で発生したチェレンコフ光を集光点カメラのある一点に集めてチェレンコフ光の到来角度やエネルギーの大きさを調べる。この 198 枚の分割鏡は強化カーボンによってできた支柱で支えられているが、LST 全体の重量は約 100 t もあり、また望遠鏡が建設されている場所は環境の変化の大きい山の上であるため様々な気候変化に晒されており、支柱の歪みなどで分割鏡の焦点がズレることがある。この焦点のズレはアクチュエータと呼ばれる角度調整装置により補正を行うが、補正にはコンピュータからアクチュエータへ補正信号を飛ばして行う。現在、補正にはアンテナ 1 本で信号を飛ばしているが、電波強度が安定しないことがある。このことから本研究ではアンテナを 2 本にした時の電波強度分布を調べ、アンテナを 2 本使用する可能性について考え、評価した。

muon ring におけるチェレンコフ光の天頂角とチェレンコフ角の影響

CTA JAPAN が大きく貢献してきた大口徑望遠鏡 (LST) 1 号機が 2018 年 10 月にファーストライトを迎えた。LST のカメラ面では低空中の muon 由来の大気チェレンコフ光が放出され、カメラ面ではリング状となり、muon ring が観測される。その muon ring を調べることで、LST の光の収集率が校正できる。また、この muon ring の半径の大きさや観測される位置には天頂角 (zenith angle) やチェレンコフ角 (Cherenkov angle) が大きく関係する。本発表では、muon ring についての基本事項と観測される muon ring の天頂角とチェレンコフ角による muon ring の半径への影響について評価した。

物体の帯電がエアロダイナミクスに与える効果に関する研究的実験

自動車はタイヤと路面の摩擦や摺動による部品の摩擦によって車体が帯電し、車体周りのエアロダイナミクス (空力) に負の影響をもたらす。2016 年、トヨタ自動車と 3 M 社が共同開発したアルミテープ「TAPE, MOULDING, NO.1」は車体に貼り付けることで車体に帯びた静電気を除去して本来の走行性能を発揮できるといった製品である。本研究では流体力学と電磁気学とりわけ静電気学の双方の観点から理論的な解析を行い、また針対平板型電極の誘電コイルを用いた放電場における気流の観測や帯電量の違うポリエチレン球を用いて可視化風洞実験を行い、乱流やカルマン渦といった流体力学で考えられる現象に静電気がどのような影響を及ぼすのか評価した。

生物物理学研究室

塩水振動に見る周期の不壊性

生命活動において、心臓の鼓動や細胞分裂などの周期的な運動を物理学の観点から考える時、例としてたびたび話題に挙げられるものの一つに塩水振動という非生物材料で再現可能な現象がある。ある特定の状況下で、塩水と真水を小孔の開いた壁で上下に隔てると、小孔を介して塩水と真水が周期的に行き来し始める、という現象である。驚くべきことにこの現象が初めて発見されたのは、ごく最近 1970 年のことである。その発見の新鮮さと、生命活動のメカニズムに通じるものであることに興味を抱き、今回研究に臨むに至った。先行研究により、ハーゲン・ポワズイユ流の方程式から、周期に変化を及ぼすものは塩水の濃度、小孔の半径、塩水を投入する容器の半径だと判明した。よって本研究では、塩水の濃度が周期にどのような影響を及ぼすかを実験により考察することとした。

非可溶性界面活性剤のマランゴニ対流への影響

可溶性界面活性剤で水中に液滴を作りその液滴から拡散することにより、水表面で濃度勾配が発生することでマランゴニ対流という対流現象が発生する。その時、水の表面張力は自発的に振動することが知られており、その振動や周期などの特性は様々な条件によって決まることが分かっている。先行研究より、容器の内径が大きくなると振幅が小さくなり、周期は大きくなる。また、液滴の浸水深さと振幅、周期は無関係であることが分かっている。一方、非可溶性界面活性剤を水表面に展開すると、容器の内径や液滴の浸水深さによって振幅や周期がどのように変化するのが知られていない。そのため、本研究では非可溶性界面活性剤を用いて液滴の浸水深さや容器の内径を変えて測定し、非可溶性界面活性剤のマランゴニ対流への影響を考察する。

粒子画像流速測定システムの開発と、それを用いたマランゴニ対流の流れの解析

表面張力が液体表面の場所によって異なった場合、この表面張力差を駆動力として対流 (マランゴニ対流) が発生する。本実験では水面下に可溶性油の液滴をつくることで表面張力差を作り出し、このときに発生する特徴的な対流を表面張力と流速の関係について研究を行った。それに伴い、流速を測定するにあたり、液体表面に浮かべた粒子を追跡し、位置座標のデータを収集することで流速を調べるプログラムを Labview にて作成した。このプログラムと表面張力を測定するプログラムを同期させ実装した。その結果、驚くべきことに対流は流れ続けるのではなく、ある間隔をあけて断続的に往復運動していること、この対流が発生したタイミングで表面張力が急激に減少していることがわかった。

マランゴニ対流が発生したときの水面上における表面張力の分布の観測

液体表面には、液体の中にもものを引き込もうとする表面張力がある。この表面張力は、温度や物質の濃度差によって変化し表面張力の大きさが不均一になる。表面張力が小さい方から大きい方に引っ張られ、液体表面上で流れが生じる。これをマランゴニ対流という。先行研究では、超純水内に可溶性界面活性剤の液滴を作りそれが溶け出し濃度勾配を起しマランゴニ対流を観測している。このマランゴニ対流によって水の表面張力が自発振動していることが分かったが、なぜこの現象が起こるのか具体的なメカニズムは分かっていない。よって、本研究では、可溶性界面活性剤の液滴が溶け出し濃度勾配を引き起こしているのなら、液滴付近での表面張力の変化が現れるのではないかと考え、表面張力計を 2 つ用意し、液滴からの距離が近い位置と遠い位置に設置しマランゴニ対流中の表面張力の変化は異なるのか測定した。

X 線反射率計算による気液界面に吸着するタンパク質の構造決定

水面に滴下されたタンパク質は気液界面に吸着し、構造が崩れる。この現象は X 線反射率法を使用し、気液の界面への吸着過程におけるタンパク質の初期構造を観察することで解明された。X 線反射率法とは X 線の反射強度を測定することで深さ方向の電子密度を求める方法のことである。ただしタンパク質は疎水基を持ち、気液界面ではこれを気相側に向けるため、界面の深さ方向に電子密度が大きい領域や小さい領域が生じる。先行研究ではこのことを考慮した上で、様々な方向からの電子密度分布を求めることで、界面への吸着過程におけるタンパク質の初期構造が元の構造より薄い構造をとることがわかった。本研究ではタンパク質における X 線反射率を計算するプログラムを作成し、吸着過程における初期構造と吸着する前のタンパク質を比較することで、構造が薄くなっていることを確認する。