変形された 2 次元トポロジカル系のエッジ状態

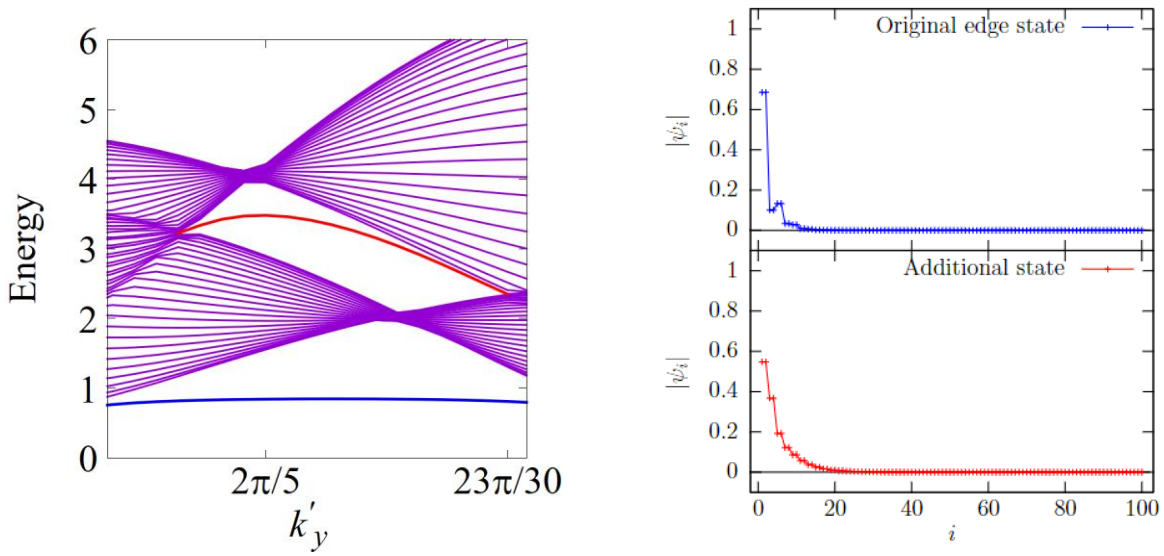
早川　浩平（物性理論教室）

通常の超伝導状態は、ある種の物質が極低温で電気抵抗がゼロになる現象で、超伝導状態では電気がエネルギーを失わずに物質中を流れる。トポロジカル超伝導体では、物質内部（バルク）では超伝導状態特有のギャップが開いているが、バルクに非自明なトポロジカル不変量を持ち、系の境界（端、表面）にトポロジカルな状態（エッジ状態）が現れる。これはバルクエッジ対応と呼ばれる。現在、トポロジカル超伝導体は、低エネルギーロスの電力素子の開発や量子コンピュータへの応用が期待されている。

近年、ディラックコーンを傾けるようなハミルトニアンの代数的変形が研究されている。カイラル対称性を破るが、一般化されたカイラル対称性と呼ばれているものを保つという特徴をもつ。この変形でトポロジカルな性質は基本的に不変であるが、対称性の破れに対しては非自明な結果が証明されている。

本研究では、空間的に異方性を持つ 2 次元の $d_{x^2-y^2}$波超伝導体模型のトポロジカルな性質について調べる。この模型はカイラル対称性により、摂動などに強いエッジ状態が存在することが知られている。特に、質量項 (staggered potential)を加えた場合や副格子間ではなくスピン自由度を利用してハミルトニアンの代数的変形により、どのような性質が現れるか数値的に解析した。

単に模型にオンサイトにポテンシャルを与えた場合では、エッジ状態が安定に存在する波数領域が狭まることがわかった。スピン自由度で変形をした後に staggered potential を加えた系を調べると、単にゼロエネルギーエッジ状態が staggered potential 項の値だけ上下にシフトする。一方で、質量項 (staggered potential) を加えてからスピン自由度で変形すると、興味深いことに、ゼロエネルギー付近の元々のエッジ状態に加えて、縮退が解けた 2 つのバンドギャップの隙間に新たに上下 1 本ずつの新しいエッジ状態が現れた。これらの新たなエッジ状態の局在長は、バルクのバンドに近づくにつれて増大し、バルクのバンドに吸収される点で発散しているように見えることがわかった。



図：（左）2 次元 $d_{x^2-y^2}$波超伝導体模型を変形した場合のエネルギースペクトル。（右）系の端に局在する元々存在するエッジ状態(左図の青)及び新たに現れたエッジ状態(赤)の波動関数。

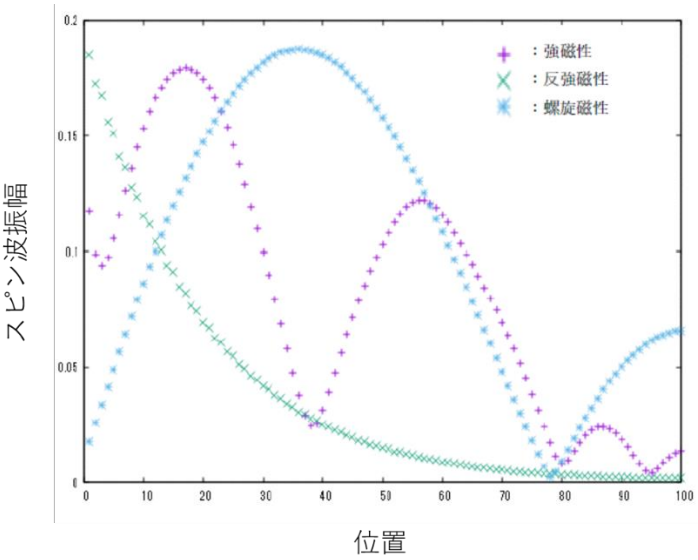
空間反転対称性の破れた磁性体における磁化ダイナミクス

橋本 隆裕（物性理論研究室）

磁性体中を一方向に伝わるスピン波は、新規マグノニック回路中の情報伝達などの応用が期待されている。しかしながら、電流と異なり、スピン波はフォノンや電子との結合で緩和してしまうため、緩和距離の長いスピン波が求められている。先行研究により、反強磁性対中を伝わるスピン波が、ネール温度付近で非常に長い緩和長を持つことが報告されている[1]。

本研究では、空間反転対称性の破れた相互作用を有する磁性体中の磁化ダイナミクスについて数値計算を用いた解析を行った。結晶構造に空間反転対称性がない磁性物質中では、隣り合う磁化はねじれた磁化構造を取り、ジャロシンスキー・守谷相互作用（DM）と呼ばれている。DM 相互作用と強磁性結合が共存するような系では、らせん磁化構造が現れる。らせん磁化構造は右巻き・左巻きの 2 種類を区別することができる。通常の強磁性結合と DM 相互作用が競合する磁性体中の磁化ダイナミクスを計算した。計算は、磁化の運動方程式である Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を 4 次の Runge－Kutta 法を用いて計算した。計算によって、DM 相互作用の正負によって、らせん磁化構造の右巻き、左巻きが決まることが分かった。さらに電流印加の影響を表すスピントルク項を導入することで、電流誘起のらせん磁化構造の平行移動が起こることがわかった。この平行移動の速度は、電流の強さに比例することが分かった。スピン波伝播にたいする計算では、1 次元上に並んだスピンの端を人工的に歳差運動させることでスピン波を励起し、系を伝わる際の緩和長を計算した。緩和長を比較する系として、強磁性状態、反強磁性体、らせん磁性体を考えた。計算の結果、らせん磁性体中のスピン波が最も緩和長が長くなった。

[1] M.Dabrowski et al, Phys. Rev. Lett. **124**, 217201 (2020)



図：スピン波振幅。左端のスピンを歳差運動させることで、右方向にスピン波が伝わっている。

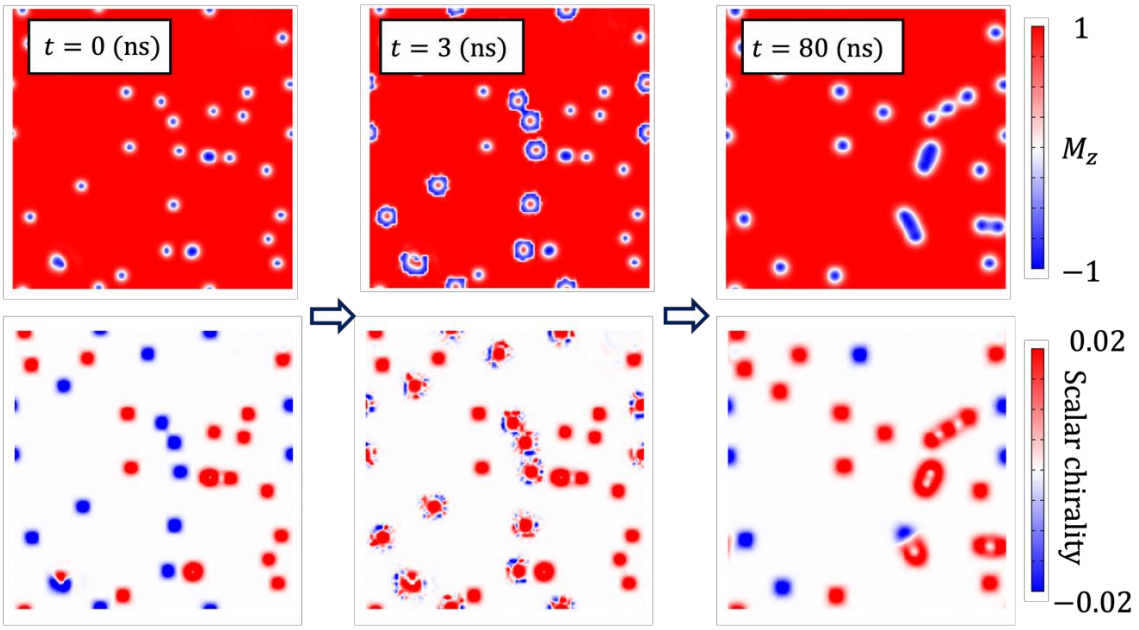
円偏光によるフラストレート磁性体中のトポロジカル量制御

宮田麻那（物性理論研究室）

円偏光を利用したフラストレート磁性体のトポロジカルチャージの制御に対して、数値的研究を行なった。磁気スカーミオン構造は、一般にジャロシンスキー・守谷相互作用によって形成されるが、他にもフラストレーション系のJ_1-J_2-J_3 相互作用を持つ古典ハイゼンベルク模型でも報告されている[1]。フラストレーション系における磁気スカーミオンでは、磁化構造の特徴量であるトポロジカルチャージが正負の場合で縮退している。そのため、ランダム状態からの緩和によってスカーミオン構造を作成すると、系の中に正負のトポロジカルチャージがランダムに分布する。先行研究により、光の有効ゲージ場と伝導電子と局所スピンのs-d相互作用を考慮することで、円偏光がトポロジカルチャージと結合することがわかっている[2]。この効果をトポロジカル逆ファラデー効果と呼ぶ。トポロジカル逆ファラデー効果を有効磁場として取り入れ、Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG)方程式を計算することによって、スピンダイナミクスを解明した。本研究では、円偏光によるフラストレート磁性体中のトポロジカルチャージの制御に対する数値的研究を行なった。

LLG方程式を数値的に解くために4次のRunge-Kutta法を用いた。基底状態は磁化のランダム状態からの緩和過程を利用して得た。トポロジカル逆ファラデー効果を有効磁場として取り入れ、磁化ダイナミクスを表すLLG方程式を数値的に解いた。円偏光の向きによって正あるいは負のトポロジカルチャージの制御をすることができる。実際にトポロジカルチャージがランダムに分布したスカーミオン構造に右向きの円偏光を照射すると、一部の負のトポロジカルチャージを持つスカーミオンだけが円偏光によって正のトポロジカルチャージにスイッチングすることがわかった[3]。

また、トポロジカル逆ファラデー効果の温度依存性を調べた。フラストレーション系での磁気スカーミオンは30(K)未満で出現する。偏光の強度を$L=0.4\times10^{-8}$ (Tm^2)としたときの照射時間と温度の依存性を調べた。スカーミオンが温度によって変更をうける領域でもトポロジカルチャージを制御でき、さらにスカーミオン構造が壊れる領域でも、トポロジカルチャージ自体は系全体で制御できることが明らかになった。

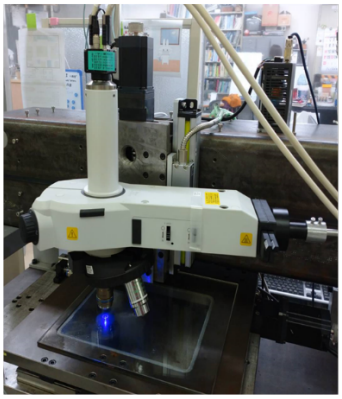


[1] T.Okubo, S.Chung, and H.Kawamura, Phys.Rev.Lett. **108**, 017206 (2012)
[2] K.Taguchi, J.Ohe, and G.Tatara, Phys.Rev.Lett. **109**, 127204 (2012)
[3] M.Miyata, J.Ohe, and G.Tatara, Phys.Rev.Appl. **18**, 014075 (2022)

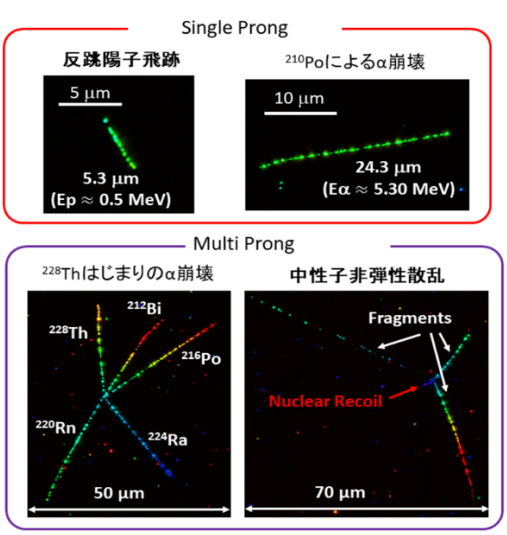
超微粒子原子核乾板による地下環境中性子測定に向けた検出器及び解析システムの開発と改良

赤松咲耶（素粒子物理学教室）

素粒子分野において暗黒物質やニュートリノを伴わない二重β崩壊など稀な事象探索実験は主に地下環境で行われている。地下環境中性子はこれらの信号探索における背景事象となりうるため、その理解は非常に重要である。本研究は超微粒子原子核乾板(以下 NIT)を用いた地下環境中性子測定のための手法開発及び改善を行ったものである。NIT とは、70nm の AgBr(I)結晶が高密度に分散された構造を持つ検出器であり、入射した中性子が反跳した NIT 中の水素原子核(陽子)の飛跡を信号として捕らえることで中性子検出を行う。NIT はこの反跳陽子飛跡を約 100nm の精度で記録出来る固体飛跡検出器で、飛跡の幾何学的特徴をナノスケールで保持することが出来る検出器である。測定対象となる反跳陽子飛跡は 1μm 以下から数 10μm と極短であり、このスケールの飛跡を効率よく収集するためには高速かつ高精度での自動飛跡読み出し系が必須である。これらの要望を満たすべく独自開発した自動読み出し装置と自動飛跡認識アルゴリズムを駆使した測定系を用いた較正を行った。較正は産業技術総合研究所にて 880keV 単色中性子照射によって記録した反跳陽子飛跡の解析で行った。反跳陽子飛跡の飛程と散乱角度から、提供された中性子エネルギー880keV を 31%の分解能で再構成することに成功した。また、検出された事象数は実験環境を再現したセットアップと実際に照射した中性子スペクトルを用いた Geant4 シミュレーションから、250keV 以上の反跳陽子飛跡において期待される検出数に対し 100%無矛盾での結果を得た。達成した読み出し速度は約 $80cm^3$/year であり、従来の 10 倍以上の速度での読み出しを高精度で行えることを示し、本システムを用いて 2021 年イタリア・グランサッソ地上環境中性子スペクトル測定を行い、250keV～1MeV の環境中性子スペクトル及び中性子フラックス(7.6±0.3)× 10^{-3}/s・cm^2を得た。さらに、測定エネルギーの低閾値化を目指した検証を行った。その結果 100keV の陽子に対して約 20%の検出効率を有し、その角度分布は入射陽子の多重電磁散乱とラザフォード散乱によって説明できた。本解析方法によって反跳陽子エネルギー250keV から 100keV への低エネルギー閾値化の可能性を示した。



自動飛跡読み出し装置PTS-4



NITに記録される様々なイベント

*飛跡は深さ方向に対応した色付けをしている

局在表面プラズモン共鳴現象を応用した超微粒子原子核乾板中における荷電粒子識別の研究

森崎紘明（素粒子物理学教室）

原子核乾板は、ゼラチン中に 200 nm のハロゲン化銀結晶が分散された構造を持つ放射線検出器である。ハロゲン化銀結晶に荷電粒子が貫通すると電離作用により生じた電子-正孔の対が、潜像核を形成する。潜像核の現像処理によって現像銀が形成される。暗黒物質探索実験のためにハロゲン化銀結晶を数 10 nm に小さくし、高密度に分散された超微粒子原子核乾板（NIT）が開発された。原子核乾板は高エネルギー粒子による長い飛跡検出に威力を発揮するが、NIT は低エネルギー粒子が作るサブミクロン以下の短い飛跡検出にも威力を発揮する。現像銀の観察には光学顕微鏡が用いられるが、光学顕微鏡の分解能は可視光で 200 nm 程度が限界である。NIT 中の現像銀はせいぜい 100 nm 程度であり、光学分解能の限界以下のサイズである。光学分解能以下の情報を取り出すことは重要であるが、ナノメートルの分解能を持つ電子顕微鏡による観察では時間がかかってしまう。現像銀に対して光学顕微鏡以下の情報を取得するために局在表面プラズモン共鳴（LSPR）現象に着目した。金属ナノ粒子に光が入射すると、その金属の形状に応じ、ある波長に対して強い散乱光が発せられる。この現象を LSPR と呼ぶ。現像銀は金属ナノ粒子であるため LSPR により発光する。よって現像銀に対して LSPR を応用した光学分解能を超えた観察の可能性がある。LSPR はナノスケールの形状の差から共鳴波長に違いが生まれるため、様々な荷電粒子が作る現像銀の光学応答に差が生じることが期待される。本研究の目的は NIT 中における現像銀の LSPR を応用した新たな解析方法を開発及び検証し、様々な荷電粒子からなる現像銀の光学情報をパラメータとした機械学習により、それらの識別の可能性を示すことである。まず現像銀の LSPR による散乱光を複数の波長で観察するために、ビームスプリッタ、マルチバンドパスフィルタ、プリズムカメラを用いた光学系を組んだ。その光学系の検証を行うために、LSPR の光学応答が既知である金属ナノ粒子の光学情報を観測しその波長スペクトルを取得した。金属ナノ粒子の LSPR の光学応答が反映されたスペクトルが得られ、その光学系で期待したスペクトルが取得できていることを確認した。暗黒物質探索実験で NIT 中に含まれる放射性同位体による電子事象は背景事象となり NIT に含まれる C,H 反跳事象は信号となる。よって、炭素事象-電子事象識別と陽子事象-電子事象識別は暗黒物質探索実験において有用である。それらの疑似事象となるサンプルを作成しそのスペクトル形状の差を観測した。機械学習による識別から、炭素事象-電子事象識別では疑似信号事象数を 71%維持しながら疑似背景事象を 91.2%除去できることが分かった。陽子事象-電子事象識別では疑似信号事象数を 94%維持しながら、疑似背景事象を 97.6%除去できることが分かった。以上の結果から、NIT 解析情報の増加を可能にし、個々の現像銀による荷電粒子識別の新たな手法の展開を示した。

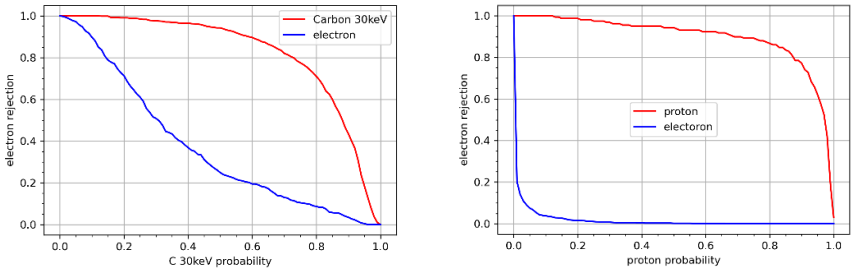


図 1 左図が炭素事象-電子事象、右図が陽子-電子事象の efficiency curve

有機ディラック電子系α-$(BETS)_2I_3$の圧力下輸送特性

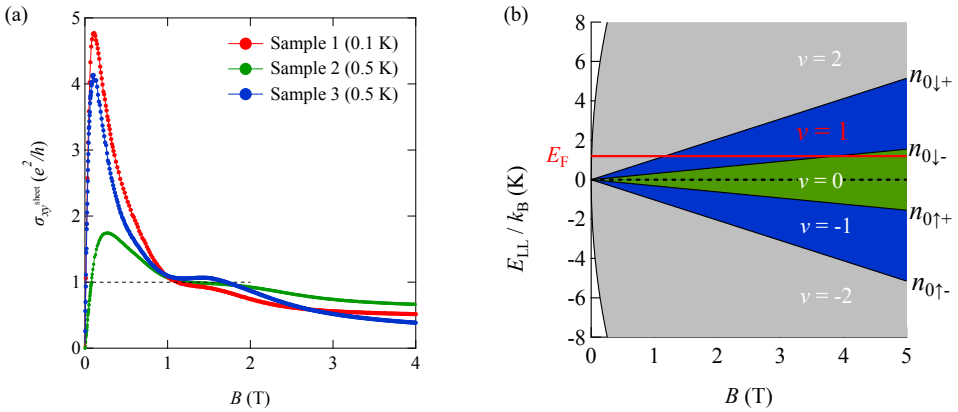
岩田　和之（物性物理学教室）

グラフェンの実現以来、有機導体、トポロジカル絶縁体の表面、さらには鉄系超伝導体などでもディラック電子が発見され、固体中電子の一類型として広く認知された。着目される理由は、2 つの円錐型バンドが上下から角突き合わせた特殊なエネルギー構造をもつことにより、素粒子ニュートリノと同様な性質の電子が固体の中に存在することにある。その中で、有機導体 α-$(BETS)_2I_3$は常圧力下では質量ギャップをもつディラック電子系であることが示唆されている。一方、圧力印加で質量ゼロのディラック電子系が実現する。

1.　本研究の目的は、α-$(BETS)_2I_3$は圧力でどのように質量ゼロのディラック電子系へと切り替わるのかを明らかにすることである。本研究では、α-$(BETS)_2I_3$の層間磁気抵抗に$N = 0$ランダウ準位効果を検出し、その圧力依存性から上記目的を達成することを試みた。しかし結論は、全圧力域で層間磁気抵抗に$N = 0$ランダウ準位効果を検出できなかった。理由の 1 つは、層間伝導がインコヒーレントで 2 次元性強いために、層間抵抗には層内抵抗の情報が含まれるためである。また、高圧力下における質量ゼロのディラック電子系でも$N = 0$ランダウ準位効果が検出できていないのは、低温でのキャリア濃度からフェルミエネルギーがディラック点から 1-2 K ほど離れていることも理由の 1 つである。

2.　そこで次に、高圧力下の質量ゼロのディラック電子系において量子ホール効果を低温で実現することを目的にした。結果、低温で$\nu = 1$の量子ホール効果を 1.5 T 程度の磁場下で観測した（下図）。一般に、量子ホール効果は 2 次元電子系において極低温・高磁場下で実現する現象である。バルクな結晶で量子ホール効果が実現する例は非常に希少である。

3.　α-$(BETS)_2I_3$は常圧力下でスピン軌道相互作用に伴う質量ギャップをもつディラック電子系であることが指摘されている。つまり、この系は常圧力下で 2 次元トポロジカル絶縁体が実現していることが期待される。バルクとエッジにおける低温・磁場下での電気伝導性に顕著な違いを見出し、エッジ状態があることを示唆する結果を得た。



図：(a) 3 試料で調べた 1 層あたりのホール伝導度の磁場依存性。1.5 T 近傍に見られるプラトーは$\nu = 1$量子ホール効果を示す。(b) 高圧下における α-$(BETS)_2I_3$の低次ランダウ準位。n_0は$n = 0$ランダウ準位を示し、添字の↑,↓はスピン分裂、+,−はバレー分裂を表す。

炭素分子正・負イオンの再帰蛍光観測

井上 花（原子過程科学教室）

孤立環境下に置かれた分子の内部エネルギー散逸過程、いわゆる「冷却過程」は宇宙空間における分子の合成進化にも大きな影響をもつ重要な事象である。宇宙空間のような孤立環境下では、イオンを含む分子は生成直後に内部転換によってその内部エネルギーを分子振動として蓄えた高温状態となり、その後は分子の解離や電子脱離によってイオンが壊れる、もしくはゆっくりと振動輻射によって赤外線を放射しエネルギーを散逸すると考えられていた。しかし近年、フランス Lyon 大グループや東京都立大グループなど多くのグループが、孤立環境下の分子イオン冷却過程を遅延解離・電子脱離速度定数の詳細測定から議論し、内部転換の逆過程である逆内部転換によって分子振動エネルギーが電子励起に転換され、その後の電子遷移による蛍光『再帰蛍光』放出に伴う速い冷却過程が存在することが確認された。また、都立大学では炭素鎖分子負イオン C_4^-,C_6^-を、京都大学では芳香族炭化水素ナフタレン正イオンをそれぞれ対象に、再帰蛍光の直接観測にも成功している。

本研究では、東邦大学が有するレーザーアブレーションイオン源で生成された炭素分子正・負イオンを対象に、可視・近赤外領域の再帰蛍光観測（図 1 参照）を行った。生成イオンは多段階加速によりおよそ 350 eV に加速され、イオン光学系を通じて蛍光観測領域に輸送される。観測領域通過時にイオンから放たれた蛍光は光学窓、および集光光学系を通じて電子冷却器付光電子増倍管に集光され、単一光子計測される。透過波長の違う 8 枚の干渉フィルタを入れ替えながら、レーザー照射によるイオン生成からの経過時間ごとに検出光子量をマルチチャンネルスケーラで計数し、観測領域下流にあるビームモニタへのイオン到達時間と比較してイオン種ごとの蛍光強度を導出した。本研究にて炭素分子の再帰蛍光は正イオン 14 種類、負イオン 4 種類、正負イオン合わせておよそ 20 種類のイオン種について新たに観測に成功し(図 2 参照)、再帰蛍光が多原子分子一般に起こりうる分子過程である事を明らかにした。

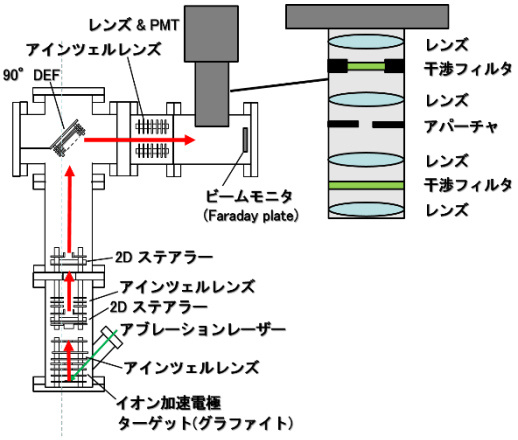


図 1：実験概略図

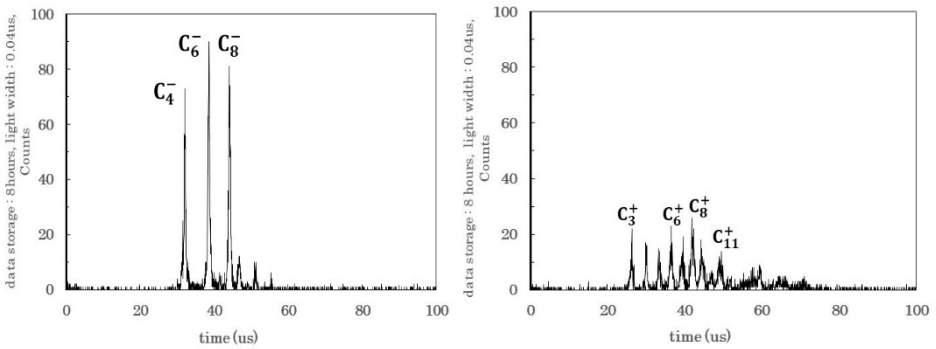


図 2：794 nm の干渉フィルタを用いた観測結果.

(左)炭素分子負イオン，(右)炭素分子正イオン

荷電ブラックホールによる高次元重力理論の検証

加納　大己（宇宙物理学教室）

一般相対性理論は最も適応範囲の広い重力理論であり、様々な観測的テストをクリアしていて今のところ、綻びは見つかっていない。しかし、ブラックホール内部の特異点の存在を予言することや、重力場の量子化が成功していない、などの問題がある。

これに対し、量子重力理論を含む物理の究極理論の候補として超弦理論がある。一般相対性理論では、ブラックホールが電荷を持っていても、すぐに反符号の電荷を引き付けて中性化してしまうため存在しないことが期待される。一方、超弦理論が成立するには 10 次元時空が要請されるが、これを 4 次元時空までコンパクト化にする際に、ゲージ場のベクトルポテンシャルが副産物として現れる。このゲージ場によって、大きな電荷を持つブラックホールが存在できる可能性がある。従って、荷電ブラックホールの存在を検証することは、超弦理論に代表されるような高次元重力理論の存在を示唆する。

非荷電ブラックホールと荷電ブラックホールを判別する方法として、2019 年に M87 銀河の中心にある超巨大ブラックホールに対してその撮像に成功したブラックホールシャドウの観測が挙げられる。これは、ブラックホール周りのガスに存在する光子が、強い重力によって軌道が曲げられながらも地球に届いた光を観測したものである。光子の軌道はブラックホール質量と電荷に依存するため、電荷の有無で軌道が変わりシャドウの形が変わるはずである。

そこで本論文では、シャドウを計算する数値コードを作成し、荷電ブラックホールと非荷電ブラックホールで、リング状のシャドウの外径と内径、その差の電荷依存性を調べた。その結果、ブラックホールから非荷電ブラックホールの事象の地平面の半径の 6 倍離れた所から光子を飛ばしたとき、非荷電ブラックホールと、最大電荷の荷電ブラックホールを比べると、荷電ブラックホールの方が、内径が 10%小さくなること分かった。そのため、10%の範囲で内径を同定することができれば、非荷電、荷電ブラックホールを区別できる可能性があることが分かった。対して、ブラックホールが持つ電荷の大きさが最大の 20%程度だった場合には、10^{-4}程度しか小さくならないので、同定には極めて高い空間分解能が必要であることも分かった。