東邦大学

2021 年度

東邦大学大学院理学研究科物理学専攻

修士・博士論文予稿集

修士論文発表会

2022 年2月 21 日（月）

修士論文発表会プログラム （講演20 分、質疑5 分）

※ 状況により時間変更の場合があります。

2022年 2月 21日（月）

1. 物性理論教室　9:00 ～ 9:50
2. 磁気物性学教室　9:55 ～ 10:45
3. 物性物理学教室　10:50 ～ 11:40
4. 素粒子物理学教室　11:45 ～ 12:10

----- 昼休み -----

5. 宇宙物理学教室　13:00 ～ 14:40
6. 量子エレクトロニクス教室　14:45 ～ 16:00
7. 原子過程科学教室　16:05 ～ 16:55

カゴメ格子上の異方的スピン系の量子相と量子化ベリー位相

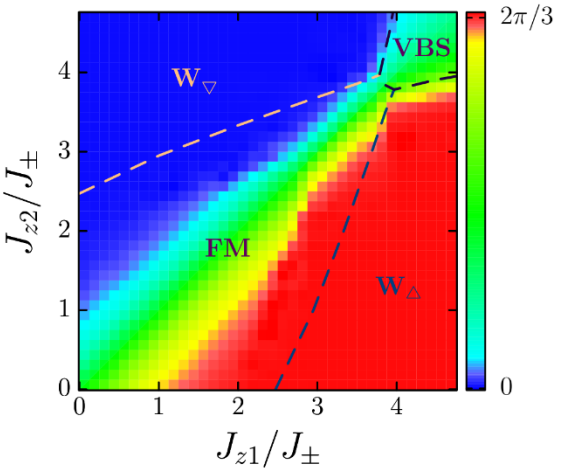
青柳 克（物性理論教室）

異方性をもつカゴメ格子上の $S = 1/2$ XXZ 模型には、強磁性（FM）相、バレンスボンド固体（VBS）相、W 相とよばれる 3 つの相が存在する。無限系での各相の相境界は、FM 相、VBS 相を特徴づける物理量によって得られているが、当時はトポロジカル相である W 相を特徴づける物理量は考案されていなかった。後に、W 相は、$\mathbb{Z}_3$ ベリー位相によって特徴づけられることが議論され、厳密対角化法を用いた数値計算によって検証されたが、そこでは無限系の相転移の臨界点と大きくずれ、定量的な一致が得られなかった。その原因として、系のサイズが小さいためであると考えられているが、厳密対角化法では十分大きなサイズの系にアプローチすることができない。

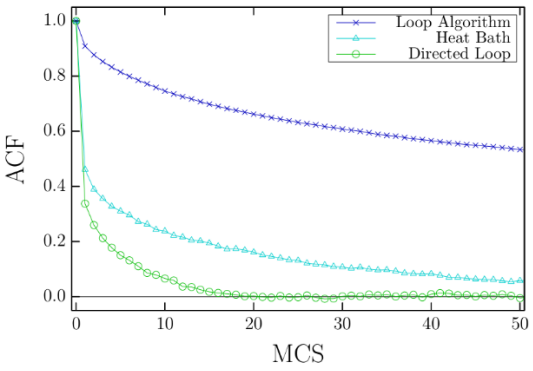
ループアルゴリズムを用いた量子モンテカルロ法による量子化ベリー位相の計算手法が考案された後、そのアルゴリズムによって本模型の $\mathbb{Z}_3$ ベリー位相の計算が行われたが、計算効率が著しく悪い場合があり、臨界点近傍の振る舞いが明快な計算結果は得られなかった。ゆえに、より計算効率の良い別のアルゴリズムを用いた量子化ベリー位相の計算手法が必要となる。

本論文では、オペレータループ更新を含むアルゴリズムによる量子化ベリー位相の計算手法の改善を行い、$\mathbb{Z}_3$ ベリー位相の計算効率をループアルゴリズムと比較した。結果、大幅な計算効率の向上が見られ、そのアルゴリズムの実効性を示すことができた。また、各相において、より高い精度での $\mathbb{Z}_3$ ベリー位相の計算を実行し、$24 \times 24 \times 3$ スピンを有する系でベリー位相を評価した。結果、W 相と VBS 相の臨界点近傍で、W 相で量子化した $\mathbb{Z}_3$ ベリー位相の定量的な変化から、相境界を定量的に評価可能であることを示した。

一方、$\mathbb{Z}_3$ ベリー位相は W 相と FM 相の相境界近傍では、本来 FM 相と予想されるところでも量子化した値となった領域が存在した。その理由を、FM 相が有限サイズの系でエネルギーギャップを持つためと考察し、そのような秩序相とトポロジカル相の相境界を評価する際にはギャップレス相を過小評価してしまう可能性があることが分かった。



$24 \times 24 \times 3$ スピンのある系における、推定量としての $\mathbb{Z}_3$ ベリー位相。



ループアルゴリズムとオペレータループ更新を含むアルゴリズム（Heat Bath および Directed Loop）の、量子化ベリー位相の計算効率の比較。自己相関関数（ACF）が小さいほど効率が良い。

マルチバンド系におけるトポロジカル欠陥と非整数電荷

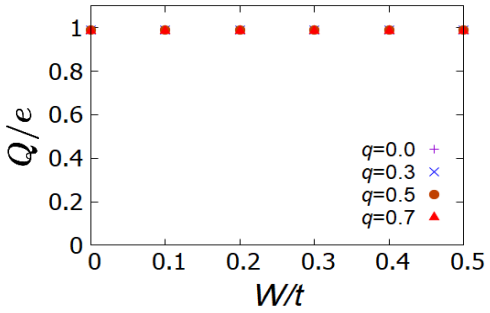
保 亮一朗（物性理論教室）

ディラック電子系は、波数に線形な分散関係を持つためにディラック･コーンと呼ばれる特徴的なエネルギー分散を持つ。ディラック電子系の代表例であるグラフェンでは $E=0$ ランダウ準位に起因する特異な量子ホール効果が観測されているが、トポロジカル欠陥に付随する分数電荷励起が存在する系としても知られている。実際、六角格子のケクレ構造において、秩序変数にトポロジカル欠陥であるvortexが存在する場合、分数電荷が現れることが理論的に示されており[1]、数値計算でも確認されている。

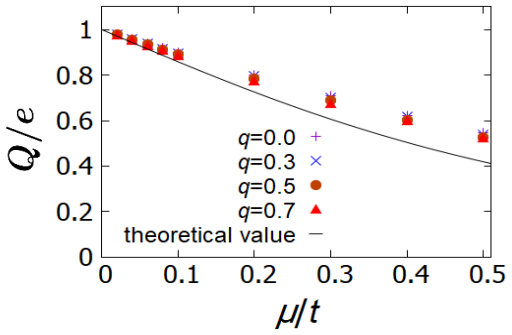
先行研究では、分数電荷はvortexの渦度に比例し、カイラル対称性を保存するようなランダムネスに対しては分数電荷が安定であること、staggered potentialと呼ばれるポテンシャルを加えたときの分数電荷の振る舞いが有効理論[2]と一致することが六角格子モデルで確認されている[3]。

本研究では、ディラック･コーンが傾いた場合にこれらの性質が普遍的に保たれるのかについて、精密な数値計算による検証を行った。六角格子モデルでは、ディラック･コーンを傾けようとすると同時にカイラル対称性が破れてしまうため、コーンの傾きとカイラル対称性を独立に議論することができない。そのため、本研究では非可換ゲージ場を導入した内部自由度のある 2 次元正方格子モデルを用いた。このモデルは、コーンを傾けた際にも内部自由度があるためにカイラル対称性が破られず、コーンの傾きと分数電荷の関係を独立に調べることができる。大規模系の局所状態密度計算に適した計算手法である Kernel Polynomial Method[4]などを用いて、vortexに伴う分数電荷とディラック･コーンの傾きの関係、傾けた場合のランダムネスや staggered potential に対する振る舞いを数値的に研究した。

その結果、分数電荷の値はコーンの傾きにほぼ影響を受けないことがわかった。また、コーンを傾けた場合でもカイラル対称性を保存するランダムネスに影響を受けないことがわかった。staggered potentialに対する分数電荷の変化についても、コーンの傾きに依らず有効理論と定性的には一致することがわかった。また、フラットバンドが存在しても、分数電荷に対しては寄与しないことを示唆する結果を得ることができた。



ランダムネスの強さ W/t と分数電荷の関係。q はコーンを傾ける強さに相当する。



staggered potential の強さ μ/t と分数電荷の関係。q はコーンを傾ける強さに相当する。

[1] C. -Y. Hou, C. Chamon, and C. Mudry, Phys. Rev. Lett. **98**, 186809 (2007).
[2] C. Chamon, C.-Y. Hou, R. Jackiw, C. Mudry, S.-Y. Pi, and A. P. Schnyder, Phys. Rev. Lett. **100**, 110405 (2008).
[3] T. Kawarabayashi, Y. Inoue, R. Itagaki, Y. Hatsugai, H. Aoki, Annals Phys. **435**, 168440 (2021).
[4] A. Weiβe, G. Wellein, A. Alvermann, H. Fehske, Rev. Mod. Phys. **78**, 275 (2006).

カミオカイト型酸化物 $Fe_2Mo_3O_8$ の磁性における Fe サイト置換効果

岩瀬 健哉（磁気物性学教室）

要旨

カミオカイト型酸化物 $Fe_2Mo_3O_8$ は擬二次元構造を持つ反強磁性体で，60 K 付近で磁気転移を示すことが報告されている[1]．この物質は，Fe からなる磁性層と Mo からなる非磁性層が c 軸方向に交互に積層した構造を持っている．Fe 層では，Fe^{2+} がハニカム型格子を形成している．また Mo 層では，Mo^{4+}がカゴメ格子状に並んでおり，3 つの Mo^{4+}がトライマーを形成している．$Fe_2Mo_3O_8$ は自発電気分極と磁気秩序が共存したマルチフェロイック材料としても注目されている．

これまでに，$Fe_2Mo_3O_8$ と同じ構造を持つ $M_2Mo_3O_8$ (M=Mn,Co,Zn など)の磁気的性質が調べられている．例えば，Fe の一部を Zn で置換すると，Zn がハニカム型格子の特定のサイト(四面体サイト)を選択的に占有し，その結果，フェリ磁性が発現することが報告されている．しかし，$M_2Mo_3O_8$ の物性は作製条件によって変わることがあるため，この系に関しては未だ不明な点が多い．

$MnFeMo_3O_8$ はフェリ磁性的性質を示すことが報告されているが，その起源についてはよくわかっていない．我々は，その詳細を明らかにするために，$(Mn_{1-x}Fe_x)_2Mo_3O_8$ (x=1/6~3/6)の磁気特性について再検討をした．その結果，全ての組成において，44 K 付近で急激に磁化が立ち上がり，さらに低温領域では磁化が減少することがわかった．磁化が立ち上がる温度領域ではハニカム型格子内でフェリ磁性的に秩序した部分とキャント磁性的に秩序した部分が共存しており，磁化の減少はハニカム型格子間では反強磁性的に結合したためであると考えられる．また，過去の報告に比べ，より鋭い磁気転移が観測された．これは，Mn の四面体及び八面体サイト占有率の違いによるものと考えられる．交流磁化率測定では，42 K~46 K の温度範囲で，大きな周波数依存性が見られた．これは，この温度範囲ではハニカム型格子間の磁気的相互作用が弱く，磁気的な揺らぎが大きい状態であると考えられる．Fe サイトを他の金属元素(Mg や Co)で置換した試料においても同様の実験を行った．

以上の結果から，これまで報告されたカミオカイト型酸化物 $M_2Mo_3O_8$ においても，作製条件を工夫し，M のサイト占有率を制御することで，新しいマルチフェロイック特性の発見が期待される．

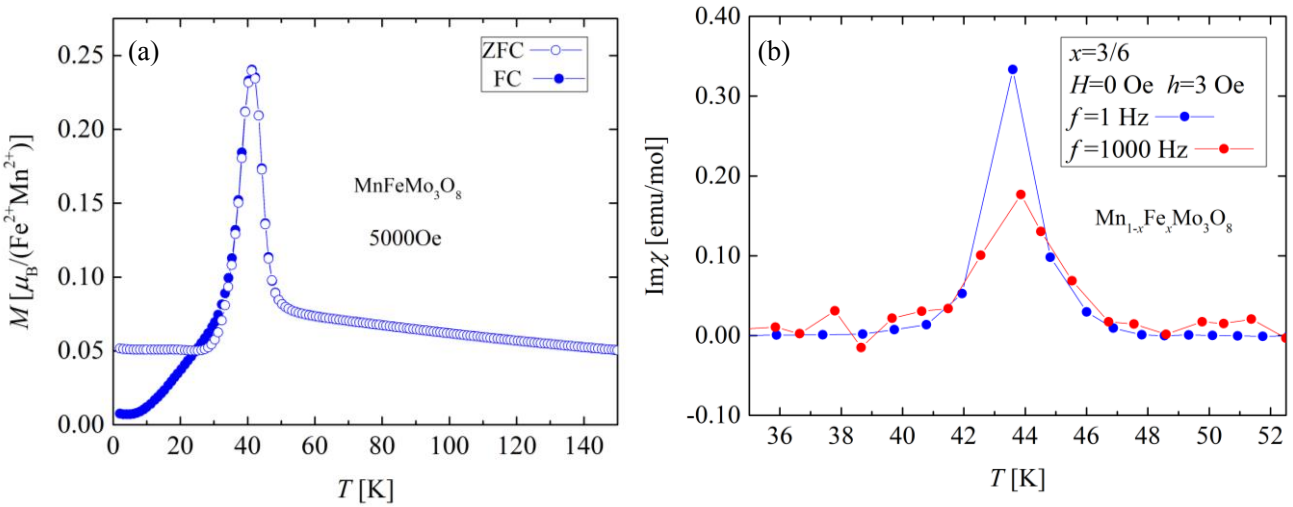


図 : $MnFeMo_3O_8$ の磁化の温度依存性(a)，交流磁化率の温度依存性の虚数成分(b)

[1] S. P. McAlister and P. Strobel, J. Magn. Magn. Mater. **30**, 340-347 (1983).

化学置換が $BaTbO_3$ の磁気特性に与える効果

細内康博　磁気物性学教室

遷移金属が混合原子価状態を持つペロブスカイト型酸化物においては、超巨大磁気抵抗効果（Mn酸化物）や高温超伝導（Cu 酸化物）などの興味深い物性が報告されている。一方、希土類元素が混合原子価を持つペロブスカイト型酸化物の物性についての報告例はほとんどない。最近、我々の研究室は、ペロブスカイト型希土類酸化物 $BaTbO_3$ に着目し、Ba^{2+}の一部を La^{3+}で化学置換した$Ba_{1-x}La_xTbO_3$が x の増加に伴い、低温の磁化が増大し、フェリ磁性的振る舞いを示すことを報告している[1]。Tb^{3+}/Tb^{4+}の混合原子価状態がこのフェリ磁性的挙動において重要な役割を果たしている。本研究では Ba^{2+}を La^{3+}、Bi^{3+}で化学置換した $Ba_{1-x}A_xTbO_3$ $(A = \mathrm{La, Bi})$ と Tb を Bi^{5+}、Nb^{5+}、Ta^{5+}で化学置換した$BaTb_{1-x}B_xO_3$ $(B = \mathrm{Bi,\ Nb,\ Ta})$を作製し、$Tb^{3+}/Tb^{4+}$の混合原子価状態が磁気特性に与える影響を調べた。

図 1 より、$Ba_{1-x}Bi_xTbO_3$（1100℃Ar 焼成）は Tb^{3+}/Tb^{4+}の混合原子価を持つにもかかわらず、$x = 0.2$ の磁化は$Ba_{1-x}La_xTbO_3$の $x = 0.2$ の磁化よりも小さく、フェリ磁性的振る舞いは明瞭には見られない。これは Bi^{5+}が B サイトに入ることによる結晶構造の乱れが原因であると考えられる。酸素が欠損した$Ba_{1-x}Bi_xTbO_3$（1100℃Ar 焼成）の磁化は、欠損していない $Ba_{1-x}Bi_xTbO_3$（1100℃Ar 焼成→500℃air 焼成）の磁化よりも大きくなる。これは、酸素欠損によって Tb^{4+}が還元され、Tb^{3+}の割合が増えているためであると考えられる。

$BaTb_{1-x}B_xO_3$ $(B = \mathrm{Bi, Nb, Ta})$の$x = 0.2$ に関しては、$B = \mathrm{Bi, Nb}$ においてはほぼ単相の試料が得られたが、$B = \mathrm{Ta}$では Tb/Ta が規則配列した相としていない相の二相が存在することがわかった。図 2 より、磁気転移は$B = \mathrm{Bi}$ では 17 K に、$B = \mathrm{Nb}$では 30 K に見られ、30 K 以下の磁化は$B = \mathrm{Bi}$よりも$B = \mathrm{Nb}$の方が大きくなっている。磁気的振る舞いの違いの原因は、Bi^{5+}と Nb^{5+}のイオン半径の違いによるものと考えられる。

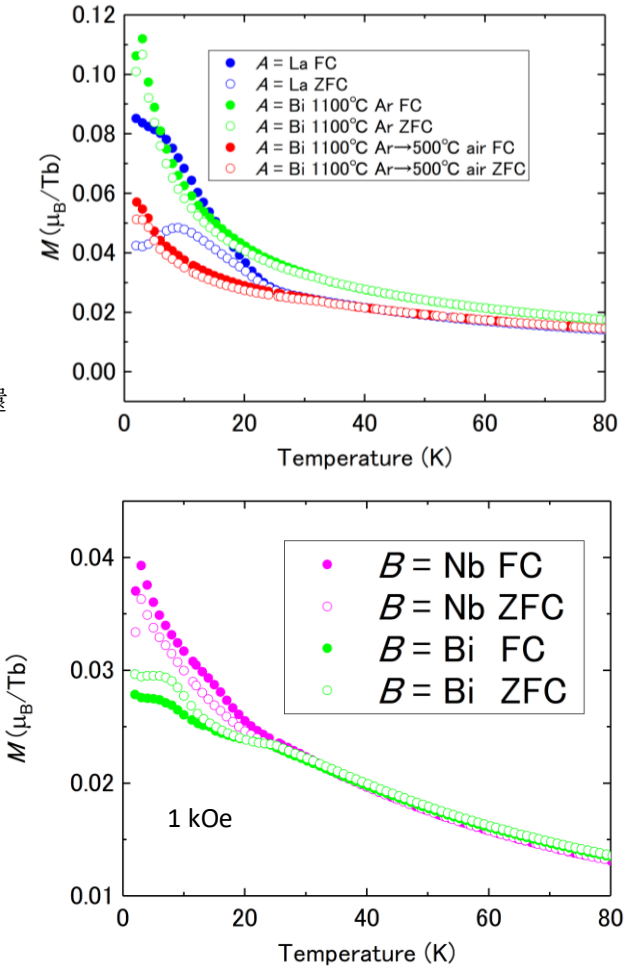


図 2　$BaTb_{0.8}B_{0.2}O_3$ $(B = \mathrm{Bi,\ Nb})$ の磁化の温度依存性

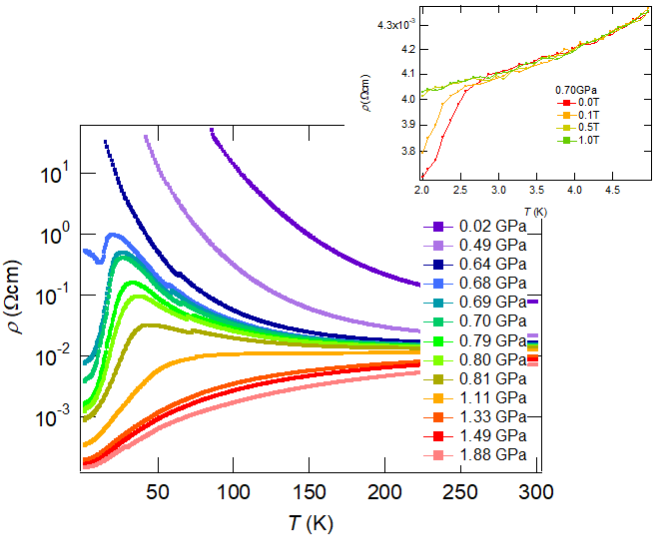
[1] D. Akahoshi, Y. Hosouchi, et. al. J. Solid State Chem. **303**, 122452 (2021).

π電子ープロトン相関型分子性導体 κ-H_3(Cat-EDT-ST)$_2$ における物理圧力下電気輸送特性

北山　元晴（物性物理学教室）

近年、固体中でのプロトンと電子系の相関に基づく新奇な固体物性が注目されている。東京大学の森、上田らによって開発されたπ電子ープロトン相関型分子性導体 κ-H_3(Cat-EDT-TTF)$_2$ (= H-TTF) は、水素結合で２分子が連結された H_3(Cat-EDT-TTF)$_2$ ユニットが κ 型に配列した三角格子 dimer Mott 系であり、二次元π電子伝導層が水素結合で連結された特異な結晶構造を有する。H-TTF は異方的三角格子を有しているにも関わらず、水素結合中プロトンの量子揺らぎによって極低温まで電子系が秩序化せず量子スピン液体（QSL）・量子常誘電（QPE）状態となる。一方、1 GPa 程度の静水圧力印加によって、プロトンの局在化と相関して dimer Mott 絶縁体から電荷秩序絶縁体へ転移するといった、特異なπ電子ープロトン相関型物性が観測された。最近、π電子系の変調を狙い H-TTF 中の TTF 骨格の一部を S/Se 置換した κ-H_3(Cat-EDT-ST)$_2$ (= H-ST) においても、H-TTF と同様の dimer Mott 絶縁体挙動や低温の QSL・QPE 的挙動が報告された。しかしながら、静水圧力下では H-TTF とは対照的に金属化し、低温領域の物性は一貫性を持たなかった。

そこで本研究では、H-ST の静水圧力下の低温電子相の解明、および水素結合/π電子系の選択的かつ系統的な変調による物性変化を調査することを目的に、静水圧力下および一軸性圧縮下の電気抵抗測定を行った。静水圧力下の測定では、H-TTF とは対照的な金属化する振る舞いが観測されるとともに、本研究においては Mott 境界付近で超伝導転移（0.70 GPa 下でT_c^{onset} = 2.7 K0.70 GPa）が観測され、絶縁化挙動は一貫して観測されなかった。一方、一軸性圧縮下の実験では、印加圧力方向に関わらず低温で絶縁化の振る舞いが観測された。この時の電子状態を考察すべく、H-ST に対して等方的圧力もしくは一軸異方的圧力下という条件で第一原理的に構造最適化を行い、得られた構造をもとに電子状態計算を起こった。その結果、等方的に圧力印加した際には水素結合中プロトンの局在化は起こらず、一軸異方的圧力下ではいずれの軸方向に対する圧力印加でもプロトンが局在化することが示唆された。上記の結果から、本系においては、静水圧性の高い圧力を印加することによって、プロトン揺らぎを保ちつつ π 電子系の遍歴性を高めることが超伝導発現に繋がったと考えられる。



図．静水圧力下電気抵抗率の温度依存性。挿入図は0.70 GPaにおける磁場印加時の低温電気抵抗率。

量子スピン液体候補物質 κ-(BEDT-TTF)$_2$Cu$_2$(CN)$_3$ に対するひずみ効果と電界効果

櫻糀大仁（物性物理学教室）

κ-(BEDT-TTF)$_2$Cu$_2$(CN)$_3$（以降、κ-CN）は、電気伝導を担う BEDT-TTF 分子のダイマーあたりホールが 1 つ存在する有機ダイマーモット絶縁体である。その他の κ 型 BEDT-TTF 塩のモット絶縁体は反強磁性を示すが、κ-CN においてはフラストレーションによって反強磁性秩序が抑えられ、量子スピン液体状態が実現していると考えられている[1]。これまでに反強磁性を示す κ 型 BEDT-TTF 塩に対して電気二重層トランジスタによるドーピングと基板の曲げ歪みによる圧力制御を行い、ドーピング-圧力相図における超伝導相の概形を実験的に調べられてきた[2]。本研究では、反強磁性モット絶縁体との相図の類似性および違いを調べることを目的として、κ-CN に対して同様の実験を行った。

電極をパターニングした PET 基板上に電解合成した厚さ 100nm 程度の κ-CN の薄片単結晶試料を貼り付け、イオン液体 EMIM-MDEGSO$_4$ を滴下することで電気二重層トランジスタを作製し、ピエゾポジショナー上にセットした。基板を押し曲げることで実効的に圧力制御することができ、同時にゲート電圧でドーピングを行うことができる。

まずハーフフィリング(ゲート電圧なし)において歪みを制御したところ、バルク試料における温度-静水圧相図と似た相図が得られ、反強磁性モット絶縁体における温度-圧力相図と確かに異なることを確認した。次にモット転移近傍でゲート電圧によるドーピングを行ったところ、高ホールドープ領域と低電子ドープ領域に超伝導相が現れた(ドーピング非対称な両極性超伝導)。超伝導転移温度は電子ドープ側、ホールドープ側ともにハーフフィリングにおける圧力下の転移温度とほとんど変わらない。これらの特徴は反強磁性モット絶縁体におけるものと似通っており、超伝導相は概ね似た形でモット絶縁相を囲んでいると推察される。

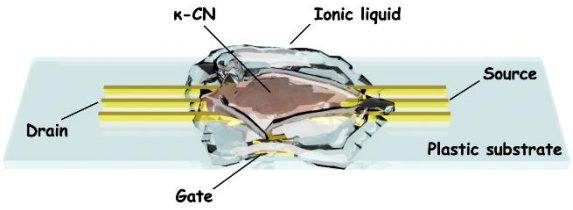


図 1： 電気二重層トランジスタ

図 2： ピエゾポジショナーによる歪み効果の模式図

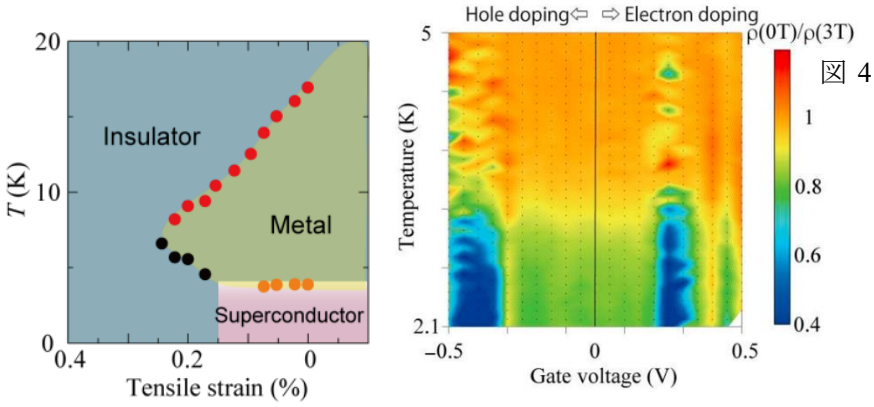


図 3： 基板上 κ-CN の温度-歪み相図

図 4： 横軸はゲート電圧、縦軸は温度、色はゼロ磁場での抵抗値を磁場中(3T)での抵抗値で割った値である。ρ_{0T}/ρ_{3T} の値が小さい程超伝導体積割合が大きいことを示している。黒点はデータ点である。

[1] Y. Zhou et al., Rev. Mod. Phys. 89, 025003 (2017). [2] Y. Kawasugi and H. M. Yamamoto, Crystals 12, 42 (2022).

エマルションスペクトロメーターにおける宇宙線を用いた性能評価

横川まゆ子（素粒子物理学教室）

標準理論(Standard Model)は現代の素粒子物理学において素粒子のふるまいを記述する理論の一つで、これまでの数多くの実験で理論に矛盾が見つかっていないが、一方でニュートリノ質量や振動、ダークマターの存在などの多くの現象を説明できていない。標準理論は自然を記述する究極の理論ではなく、これらの現象を記述できる未知の粒子や相互作用の存在が期待される。タウニュートリノは標準理論の中ではあまり性質が知られていない粒子の 1 つであり、新しい物理においてが重要な役割を果たす例がいくつか挙げられている。また、タウニュートリノの直接検出はまだなされていないのが現状である。

本研究室ではタウニュートリノ・反タウニュートリノ識別を目的としたニュートリノ検出器、Compact Emulsion Spectrometer(CES)の開発を行っている。これは $\tau \rightarrow \mu$ だけでなく $\tau \rightarrow$h(ハドロン)の崩壊モードの崩壊娘粒子の電荷識別を可能とするユニークな検出器でもある。CES は原子核乾板と低物質量の支持体を交互に積層した構造をもち、厚さ 3 cm の空間で(10 GeV/c ハドロンの場合、±4 μ m の)サジッタ s の測定を行い、τ 崩壊娘ハドロンの電荷符号を分離・識別する。

これまでに先行研究で原理検証は行われており、0.5~2.0 GeV/c ,tan θ =0 (4 cm2)の条件下で sagitta と運動量(1/p)に良い相関がみられることが確認された。さらに実用化に向けて 2020 年に行われた宇宙線照射実験では 500 μ m 厚のガラスベース乾板が平面性や熱膨張の観点から良いパフォーマンスを発揮することが確認された。6 GeV/c までの運動量で 3.2 σ 以上の精度で電荷識別可能な性能があることが確認されているが、その解析方法の不確定さと高運動量粒子に対する解析が課題となっていた。

本研究では実験設計を見直し、CES と組み合わせる ECC の積層枚数を増すことでより高い運動量領域の解析を行うことを目指し、新たに宇宙線照射実験を行った。これは磁場をかけない状態で CES および ECC に宇宙線を照射し、s=0 を中心とする sagitta 分布の幅 σ_s からその性能を確かめるものである。また、乾板二枚の密着構造（Doublet）を三枚（Triplet）へ変更し、乾板そのものの測定精度に対するより精度の高い見積もりを目指した。さらに、従来より sagitta の値を求めるための解析段階において主に目視によるパラメータ調整を行っていたが、この個人差による解析結果のずれを確認するため昨年度に行われた宇宙線照射実験の結果を用いて改めて sagitta 分布を求めた。

この結果、2020 年度宇宙線照射実験に対する sagitta 解析に関して、σ s について 2020 年度解析と比較し最大で-0.512 の差が見られ、全体的に再解析結果の方が小さい値になる傾向が確認された。また、2021 年度宇宙線照射実験については再現性および乾板保持のため塗布・現像段階での手法の見直しが必要とされることが分かった。

今後の展望として、手法に改善を重ねたうえで今回行ったものと同様のセットアップの宇宙線照射実験に対し解析を行うことでより高エネルギー側での sagitta の精度評価を行うことが挙げられる。また、SHiP 実験本番を想定したデバイスの大型化およびそのための最適化が望まれる。

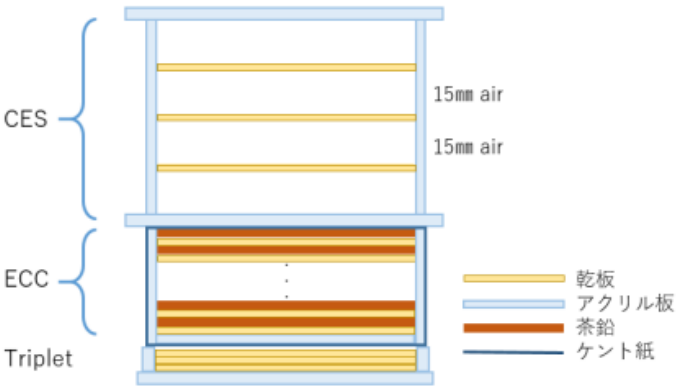


図 1　宇宙線照射実験セットアップ

スカラーテンソル理論における大質量星コアの重力崩壊で放射される スカラー重力波の数値シミュレーション

浅川　直道（宇宙物理学教室）

一般相対性理論はこれまで多くの実験をクリアしている重力理論であるが、宇宙の加速膨張の説明にはダークエネルギーが必要になることや、繰り込み不可能なため重力場を量子化することができないといった問題点も存在する。このような一般相対性理論の問題点の解決に向けた取り組みとして、一般相対性理論の拡張を考えることは重要である。本研究では拡張重力理論の中でもスカラーテンソル理論を扱う。

スカラーテンソル理論はスカラー場と重力場の非最小結合項を含む作用で与えられる理論である。スカラーテンソル理論を考える動機として弦理論の低エネルギー極限で作用にスカラー場が現れるなど、高次元重力理論とのシナジーを有すること、スカラー場が宇宙の加速膨張を引き起こせることが挙げられる。一般に拡張重力理論では重力波の偏極モードの数が増加し、スカラーテンソル理論では一般相対性理論で放射可能なプラスモードとクロスモードに加えて、スカラーモードの重力波(スカラー重力波)が放射される。スカラー重力波が観測されれば強重力場における一般相対性理論の綻びの証拠となる。

スカラー重力波の検出には重力波検出器が 4 台あれば可能となる。重力波検出器は現行の Advanced-LIGO と Advanced-VIRGO、KAGRA に加えて、LIGO-India が 2020 年代後半から観測に参加する予定であるため、近い将来にスカラー重力波を検出できる環境になる。そのためスカラー重力波の検出に先駆けて、スカラー重力波の理論波形計算が重要になる。

そこで本研究では有望な重力波源の 1 つである重力崩壊に着目し、重力崩壊で放射されるスカラー重力波を調べることを目的とする。スカラー重力波は球対称でも放射されるので、まず初めに球対称 1 次元重力崩壊計算が可能なスカラーテンソル理論 1 次元数値コードを構築した。構築したコードを用いて球対称重力崩壊の数値シミュレーションを行ない、放射されるスカラー重力波のスカラー場と重力場の結合関数への依存性を調べた。その結果、スカラー場と重力場の結合が強くなるほど放射されるスカラー重力波の characteristic strain が増加する傾向が得られた。

Neutrino driven wind における r-process 元素合成の Hypernova への適用

田中　亮哉（宇宙物理学教室）

自然界には 94 種類の安定元素が存在している。その中で水素、ヘリウム、リチウムなどの軽い元素はビッグバン元素合成によって作られ、鉄族までは恒星内部の核融合で合成される。これ以降の重元素は中性子捕獲による元素合成によって生成されたと考えられている。重元素のうち中性子捕獲のタイムスケールがβ崩壊に対して遅い s-process で合成されるものは、漸近巨星分枝内部で起こっている事が明らかになっている。一方で、中性子捕獲のタイムスケールがβ崩壊に対して速い r-process 元素合成の起源天体に関しては長い間議論が続いていた。

2017 年に連星中性子星合体(BNS)からの重力波に付随する電磁波対応天体の初観測に成功し、多波長観測の結果から r-process の生成環境の直接観測に成功した。この観測により BNS が r-process の生成環境であることの観測的証拠が得られた。しかし、BNS による r-process では説明出来ない組成を持つ天体も観測されており、BNS 以外の生成環境について調べる必要がある。

そこで本研究では、BNS とは別の r-process 生成環境として、超新星爆発やさらに高エネルギーな爆発現象である Hypernova のニュートリノ風による元素合成に着目した。中性子星からのニュートリノ風を一般相対論的流体の定常解を求める事で構築し、その流体場における r-process 元素合成を行った。そのために、SkyNet という open source software とニュートリノ風の定常解を組み合わせて元素合成計算が実行できるコードを構築した。

構築したコードを Hypernova へ適用し、質量が太陽質量の 2 倍でニュートリノ光度が10^{52} erg/s の中性子星からのニュートリノ風における r-process 元素合成計算を行い、電子モル分率として Ye=0.4、0.45、0.49 での結果の比較を行った。その結果、Ye=0.4、0.45 では BNS と似た組成が得られるが、Ye=0.49 では BNS での組成とは異なる組成になる事が分かった。

相対論的制動放射

安田　萌乃（宇宙物理学教室）

宇宙の物質はバリオンとダークマターによって構成されており、バリオンの大半は電離状態にある。プラズマがエネルギーを放出するとき、最も主要な放射過程のひとつが制動放射である。一般に制動放射は高温になるほど重要となるので、相対論的な効果に注意する必要がある。例えば、温度 $T\simeq10^8K$ の熱的プラズマに対しては、陽子をはじめとするイオンの平均速度は光速の 1%以下なので非相対論が良い近似だが、電子の平均速度は光速の 20%を超えるため相対論的効果が無視できなくなる。宇宙には、これよりも高温の熱的粒子や、さらに高エネルギーの非熱的粒子が存在するので、本研究ではそれらの基礎的な放射過程として、制動放射を相対論的に記述する。また、銀河団には熱的粒子と非熱的粒子がどちらも存在することから、本研究では具体例として銀河団のパラメーターを想定して放射スペクトルを算出した。

銀河団に対しては、X 線およびミリ波における観測から、３億度を超える高温の熱的電子の存在が示唆されている。また、センチ波ではシンクロトロン放射が観測され、非熱的電子の存在も確認されている。ただし、非熱的電子についての情報はシンクロトロン放射からのものが大半のため、その起源などは未だ不明であり、他の放射過程による今後の観測が重要視されている。非熱的制動放射は、先行研究で予言されている非熱的スニヤエフ・ゼルドビッチ効果と同じエネルギー領域の電子に起因するので、両者を組み合わせることで得られる情報も多いと期待される。

結果として、まずは制動放射の相対論的な定式化を行い、解析的にその放出率を導いた。また、電子のエネルギー分布を考えた上でエネルギー放出率を数値的に求め、放射スペクトルを算出し、非相対論的な場合と比較した。$T=5\times10^8K$ の熱的電子では、非相対論的な放出率に対する相対論的な放出率の増加率は、エネルギー$E=10keV$ で 10%程度、$E=100keV$ で 50%程度となり、更に高エネルギーでは指数関数的に増加した。この比率は、電子の温度が上がると更に増加した。また、非熱的電子が存在する場合のスペクトル形状を確認すると、$T=5\times10^8K$ の時、$E=4\times10^5eV$ 程のエネルギー領域から非熱的電子による影響が現れ始めた。更に、非熱的電子が様々な過程により冷却することをふまえ、非熱的電子のエネルギー分布の時間発展も取り入れたスペクトルを算出して考察した。

銀河団における重元素輝線の共鳴散乱

岡戸　悠一郎（宇宙物理学教室）

銀河団は高温で希薄な高階電離ガスで満たされており、高階電離した重元素イオンによる輝線放射から、ガス運動・イオン温度・重元素量などの情報を得ることができる。一般に銀河団ガスは、トムソン散乱に対しては光学的に薄いが、一部の重元素輝線に対しては、光学的に厚くなり得るため、吸収や散乱の効果が無視できない事が示唆されている。特に、高階電離した重元素イオンからの共鳴線は、放射強度が他の遷移線と比べて強いことから観測的に重要であるが、共鳴散乱によって輝線の形状や放射強度が変化し得ることに、注意が必要である。2016 年に打ち上げられた X 線観測衛星 Hitomi は、ペルセウス座銀河団中心部からの放射スペクトルを初めて精密に分光し、共鳴散乱の兆候を得たが、現状のデータはヘリウム型鉄イオンのみに限られている。次世代の X 線観測衛星では、より多くの重元素輝線が観測され、重元素量やイオン温度の測定精度の向上に繋がることが期待されている。したがって、複数の重元素イオンに対する共鳴散乱の効果を評価することは、観測技術の向上に伴って重要さが増している。

そこで本研究では、鉄に加えて硫黄・シリコン・マグネシウム・ネオン・酸素のヘリウム型イオンの共鳴線に対して、散乱の非等方性を考慮した輻射輸送方程式を解き、様々な温度領域の銀河団ガスに対して球対称分布を仮定して、詳細な計算を行った。その結果、散乱の度合いを示す光学的厚さは、温度と視線速度分散に強く依存することがわかった。特に中心温度が keV 程度の場合は鉄・硫黄・シリコンのヘリウム型イオンが光学的に厚くなり、より低温になると鉄イオン以外のヘリウム型イオンが光学的に厚くなる。中心温度が数 keV 程度で乱流運動が存在しない場合のヘリウム型鉄イオンの放射強度は、光学的に薄い場合と比べて、数十%減少することがわかった。また、音速の半分程度の乱流が一様に存在する場合は、共鳴散乱が抑制され、光学的に薄い場合と放射強度がほぼ一致することがわかった。

さらに、検出器のエネルギー分解能の影響について考察した。近い将来に予定されているエネルギー分解能(2.5〜5.0 eV)では、約 1 keV 程度以下のエネルギー帯の輝線(酸素・ネオン・マグネシウム)は、分解能が十分でないので、フラックスの変化のみが重要になる。一方で約 1 keV を超えるエネルギー帯の輝線(シリコン・硫黄・鉄)は、形状が分解できるので、イオン温度や乱流速度の測定に利用できることが期待される。

ガラスキャピラリー光学系におけるパルスレーザーマイクロビームの透過特性

三宮圭人（量子エレクトロニクス教室）

今日、マイクロビームは産業や医療などの幅広い分野で用いられている。我々はマイクロビーム生成法のツールとして、「テーパー型ガラスキャピラリー」を提案している。これは、先端の細いガラス製の注射針である。テーパー型ガラスキャピラリーは、イオンビームやレーザービームを容易にマイクロビームに生成できる。ガラスキャピラリー光学系の展望として、イオンビームアシストによる照準照射や紫外光単独によるダメージ照射のツールとして考えられている。これまでに可視光から紫外領域までの CW レーザーを用いた、ガラスキャピラリー透過特性およびビームプロファイルの実験的・理論的研究を行ってきた。照準照射では蛍光タンパクの退色や細胞への光毒性を防ぐために、ダメージ照射では線量率効果を大きくするために短時間による照射が必要になる。これらの観点から、細胞への照準照射やダメージ照射としてパルスレーザーによる照射が考えられる。

パルスレーザーとは断続的に短い時間だけパルスを発振するもので、繰り返し周波数やパルス幅、パルスエネルギー、ピークパワーなどの特性をもつ。短時間でエネルギーが集中するため、非常に大きなピークパワーを得ることができる。本研究では、平均パワー測定やパルス時間波形測定、透過縞測定からガラスキャピラリーのパルス光の透過特性について調べた。

平均パワー測定では、繰り返し周波数やパルス幅による透過率と集光率を求めた。透過率は繰り返し周波数やパルス幅による変化はなく、ほぼ一定の値が得られた。また、集光率では出口内径が小さいほど高くなり、出口内径 10 μm で約 500 倍もの値が得られた。ガラスキャピラリーにはパルス化による high-power 化にも対応でき、パルス光の集束にも優れていることが分かった。

パルス時間波形測定では、高速フォトダイオードを用いてオシロスコープで計測を行った。今までできなかった 1 パルスによる評価に成功した。この測定法を用いて、ガラスキャピラリー内壁を反射した光成分の検出が可能かの検証を行った。

透過縞測定では、波長の近いパルス光と連続光の透過縞を解析した。中心から各リングまでの距離（リング半径）からそれぞれに違いは見られず、パルス光によるガラスキャピラリー内での輸送特性は連続光と同様であることが分かった。

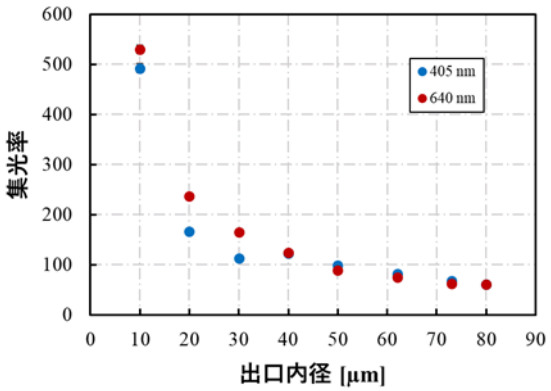


図 1：集光率による出口内径依存性

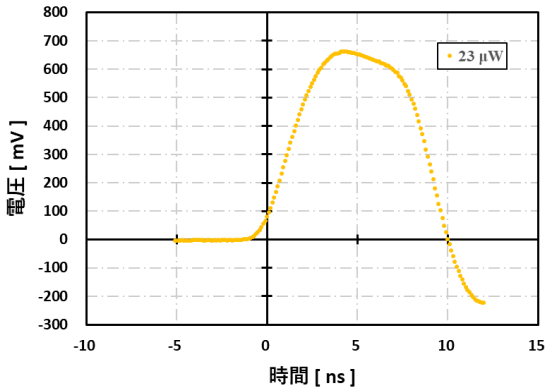


図 2：取得した波形データ

炭素線治療における照射ログファイルを用いた患者 QA 実現に向けた線量評価法の開発

相馬陽平（量子エレクトロニクス教室）

要旨

量子科学技術研究開発機構（QST）では射線治療は患者が痛みを伴うことなく、治療後も生活の質を維持することが出来るがん治療法である。放射線治療の内でも、物理学的・生物学的に利点を持つ炭素線治療が注目されている。QST では 1994 年から世界初の医療用重粒子線治療装置 HIMAC を用いて炭素線治療が行われた。2017 年からは超電導電磁石を用いた回転ガントリー照射装置 による治療も開始され、360 度任意の方向から選択して照射を行うことが可能となった。

複雑な形状の照射を可能とする放射線治療では、患者個々の線量分布検証 （患者 QA:Patient-Specific Quality Assurance） が品質保証・品質管理の観点から重要である。患者 QA は一般的に測定と治療計画装置による線量分布の比較により行われる。しかしながら患者 QA における測定には時間と労力がかかるため、治療患者数の増加に伴い、治療の品質を担保したまま、効率的に実施することが必要である。これを解決するために、陽子線・光子線治療 においては、照射ログファイルを使用したモンテカルロ計算を用いた患者 QA が 提案されている。本研究の目的は QST スキャニングシステムにおける患者 QA のための照射ログファイルと汎用モンテカルロコード PHITS を用いた線量評価法を開発することで ある。

シミュレーションに設定するソースは照射ログファイルと治療計画装置から決定した。ビーム相対強度には炭素イオンの強度分布を再現できるトリプルガウシアンモデルを採用した。(式 1)

$\boldsymbol{f(x,y) = I_{count} \sum_{i=1}^{3} G_i(x,y)}$ **(1)**　$\boldsymbol{I_{count}}$ は各スポットの重み、$\boldsymbol{G_i(x,y)}$はビーム位置とビームサイズから決定したガウス分布である。

深さ方向・横方向線量分布の実験値・計算値・治療計画の比較結果を図 1,2 に示す。実験値、計算値、治療計画(RTdose)は実験値の不確かさの範囲で線量差±3%以内の一致を確認した。開発した線量評価法は実験値を高精度に再現し、臨床現場の患者 QA において適用可能であることを示した。

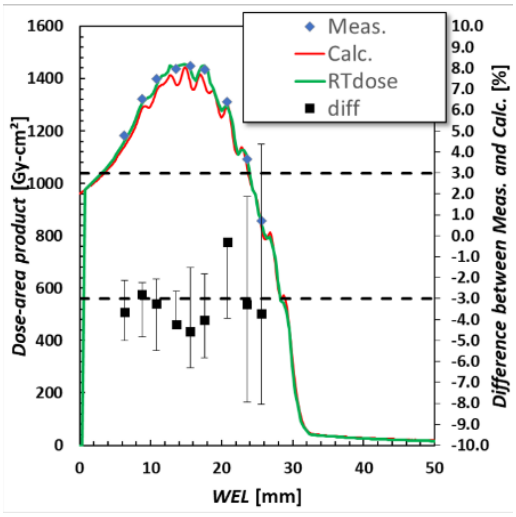


図 2:深さ方向線量分布

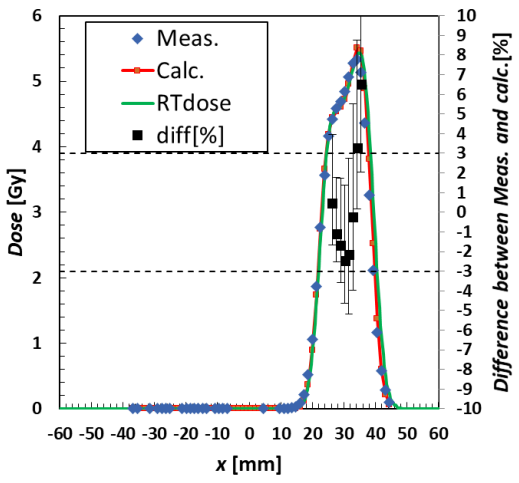


図 2:横方向線量分布

Ba $6s5d\ {}^1D_2$–$5d6p\ {}^1D_2$遷移のシュタルク・ゼーマン効果の測定

氏名　野崎　昌志（量子エレクトロニクス教室）

原子の分光測定から得られる超微細構造定数、分極率、g因子などは原子の波動関数に密接に関連し、理論計算の検証をすることができる。したがって、理論的な研究の発展にも寄与することができる。また、近年、パリティ非保存に関する測定や原子の永久電気双極子モーメント(EDM)の探索などにシュタルク効果やゼーマン効果を用いた実験が行われている。そのため高精度な分極率やg因子などの原子の基礎定数が必要となる。１電子原子であるアルカリ金属原子のシュタルク効果やゼーマン効果に関する研究報告はあるが、２電子原子であるアルカリ土類金属原子の研究報告はまだ少ない。2電子原子は電子配置や電子準位が複雑になっているため、mixing を起こすエネルギー準位が増える。

本研究室では 2 電子原子である Ba 原子に注目して、系統的にシュタルク・ゼーマン効果の測定を行っている。Ba 原子の高励起$5d6p$配位における ${}^1D_2$準位についての分光学的測定の報告はない。したがって、本研究では、$6s5d\ {}^1D_2 - 5d6p\ {}^1D_2$遷移のシュタルク・ゼーマン効果の測定を行い、テンソル分極率、スカラー分極率、ランデのg_J因子の決定を目的とした。

超微細構造、シュタルク効果、ゼーマン効果は、それぞれ電子の全角運動量と核スピン、原子の磁気モーメントと外部磁場、原子の電気双極子モーメントと外部電場の相互作用によって、スペクトル線が分岐やシフトする現象である。これらのスペクトル線の分岐やシフトは、数 MHz～数 GHz 程度である。そのため高分解能な分光測定が必要とされる。

本研究では、高分解能レーザー分光装置を用いて Ba 原子のスペクトルを観測した。外部共振器型半導体レーザーを用いて波長掃引を行い、原子線と相互作用させて蛍光を光電子増倍管で検出した。シュタルク効果の実験では、2.6～7.8 V/cm の電場を印加して実験を行った。また、ゼーマン効果では 124.0 G、146.2 G、164.7 G の磁場をかけて実験を行った。シュタルク効果の測定から、$5d6p\ {}^1D_2$準位のテンソル分極率、$6s5d\ {}^1D_2 - 5d6p\ {}^1D_2$遷移のスカラー分極率を決定した。また、ゼーマン効果の測定から$5d6p\ {}^1D_2$準位と$6s5d\ {}^1D_2$準位のランデのg_J因子を決定した。

本実験で得られた$5d6p\ {}^1D_2$準位のテンソル分極率、スカラー分極率の値は$5d6p$配位のほかの準位の分極率に比べて、数桁大きい値となった。これは、$5d6p\ {}^1D_2$準位に非常に接している異なるパリティの$5d^2\ {}^1D_2$準位があり、この 2 つの準位間の強い mixing によるものと考えられる。したがって、$5d6p\ {}^1D_2$準位と$5d^2\ {}^1D_2$準位は、シュタルク誘起のパリティ非保存(PCN)の測定が可能な候補準位となる。

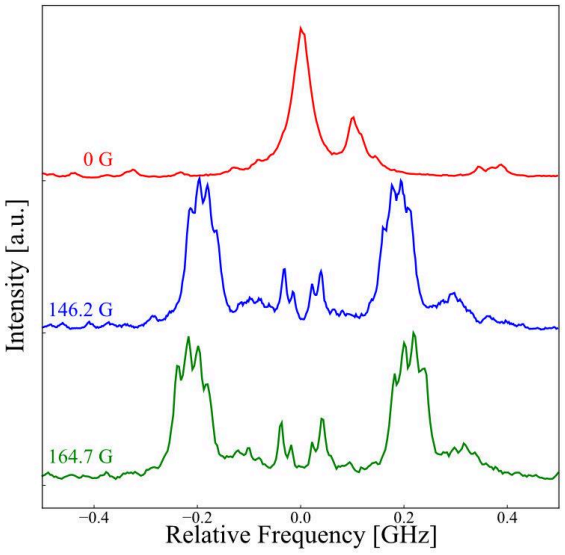


Fig.1　ゼーマン効果のスペクトル

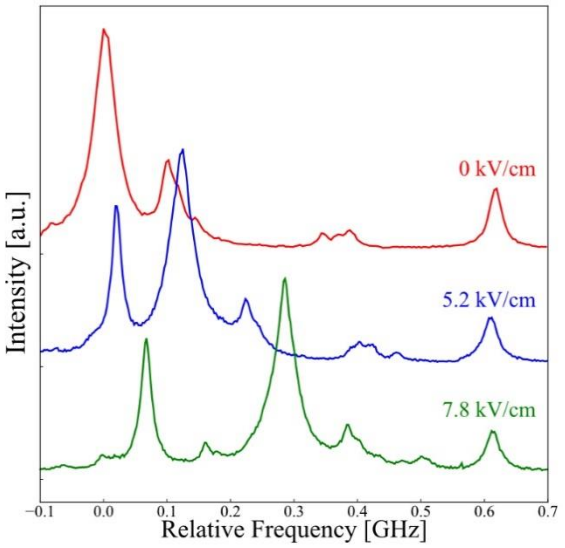


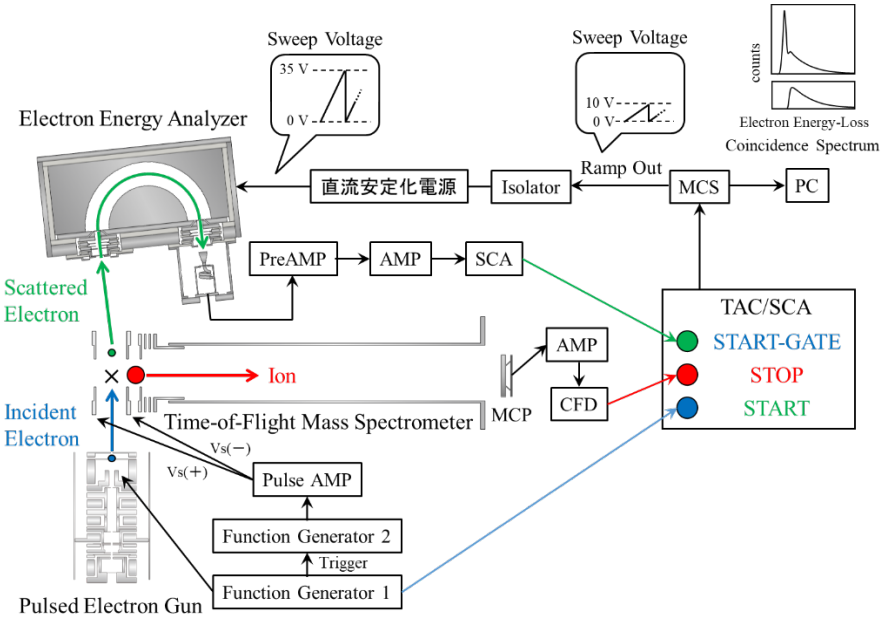
Fig.2　シュタルク効果のスペクトル

散乱電子―イオン同時計測法における CH_4 からの生成イオンの測定

菅　史明（原子過程科学教室）

電子と分子が衝突すると、両者の間でのエネルギーの受け渡しにより、基底状態から様々な状態に遷移することがある。分子が、電子から受け取ったエネルギーがイオン化しきい値を越えていれば、イオンの生成と共に電子が運動エネルギーをもって放出される。生成されたイオンが安定な時には、分子イオンが観測されるが、そうでなければイオン化と共に解離が起こるイオン化解離が起きることになる。イオン化解離は、イオンの励起状態に遷移した場合には大きな確率で起きる。また、超励起状態と呼ばれる状態の分子に遷移すると、この状態は中性状態にもかかわらず自動イオン化によりイオンの生成、あるいは自動イオン化解離も起きる。中性解離するなど、様々な原子過程を経て崩壊する。これらの過程を調べることで、各原子・分子の特徴を知ることができる。

本研究では、これまで 2 原子分子のみを対象に行われてきた散乱電子―イオン同時計測法を多原子分子に適用することを目的として行った。これは、電子を標的となる原子・分子に衝突させて生じる散乱電子と、生成されたイオンを同時に測定するものである。これにより、標的原子・分子の各励起エネルギーにおける分子イオンの生成比が特定可能となり、分子の構造やイオン化解離の過程についての情報を得ることができるが、多原子分子の場合多くの過程が存在し、現象の同時性を担保することが難しい。本装置での散乱電子のエネルギー分析には疑似半球型の電子エネルギー分析器、生成イオンの分析には二段加速型飛行時間質量分析計が用いられているので、実験には多くの手順が必要となる。特に、衝突領域が飛行時間質量分析計の加速領域を兼ねているため、電子銃および引き込み電場のパルス化が必要不可欠でそのタイミングの調整、同時計測時の信号処理等が重要である。結果として、CH_4 を標的とした散乱電子―イオン同時計測に成功した。



散乱電子―イオン同時計測における信号処理の流れ

原子力災害現場における蛍光 X 線分析の適用可能性に関する検討

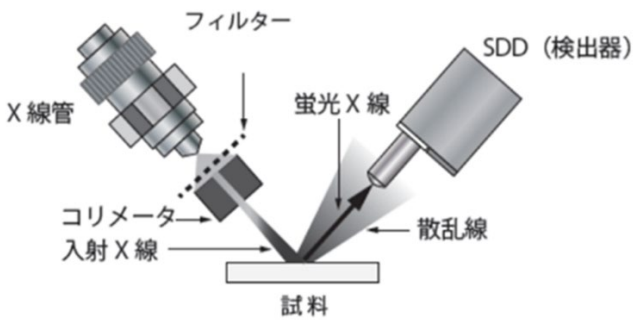
上床　哲明（原子過程科学教室）

東京電力福島第一原子力発電所事故のような原子力災害が発生した場合、作業者や周辺施設、物品を対象とした微量ウラン (U) を迅速に定量分析することが必要である。しかし、α 線放出核種である U は半減期が非常に長く、単位質量当たりの放射能が極めて低いため、従来法である α 線計測法では多量の試料や長時間の測定が必要となり、迅速な定量分析は難しい。これまで、我々の研究グループは U を含むアクチノイドを迅速に定量する方法として蛍光 X 線　(X-ray fluorescence : XRF) 分析法の活用を提案してきた。XRF 分析法とは、X 線を入射して元素の励起状態を作り、その脱励起過程で放出される元素に固有なエネルギーの蛍光 X 線を計測するもので、その信号強度は原子の個数を反映することから、U のような長半減期核種では放射線計測をはるかに上回る感度をもつことになる。しかし、実際に原子力災害が発生した現場、あるいは周辺域にて我々が提案してきた手法を用いる場合、実験室と異なり他の放射性物質も存在するような環境であるため、実験室では予期していなかった問題が生じる可能性を否定できず、測定精度が著しく悪化するなどの影響があることも考えられる。

そこで、本研究では、原子力災害後の現場分析環境下においても一般的な XRF 分析装置による微量 U の測定が可能であることを明らかにするために、核分裂生成物質中の主要放射性同位体元素による XRF 分析装置搭載検出器への影響を検討した。

実験では、セシウム-137 (^{137}Cs)、ストロンチウム-90 (^{90}Sr) コバルト-57 (^{57}Co) の標準線源を用い、これらの放射線が検出器へ入射する環境をつくり U 試料の XRF 分析を行った。^{137}Cs は核分裂生成物質中に多く含まれ、β 線と γ 線を放出する核種、^{90}Sr は純 β 線放出核種、そして ^{57}Co は γ・X 線源とみなせる核種である。実験では、これら標準線源を対象として、X 線を照射しない条件で検出器の信号を得る Passive 測定も行った。^{57}Co からの γ・X 線は U の検出に影響せず、^{137}Cs,^{90}Sr からの β 線による連続スペクトル成分の強度は小さく標準線源を検出器の至近距離に置いても XRF スペクトルへの影響は無視できることがわかった。

次に、原子力災害後の現場分析においては ^{137}Cs が地表に沈着し汚染された環境が形成されているが実験でこれを再現することは困難であるのでモンテカルロ計算コード PHITS によるシミュレーションを行った。PHITS 上に再現した ^{137}Cs 沈着平面から 1 m 離して配置した XRF 分析装置の検出器の応答をシミュレートし、^{137}Cs による β 線, γ 線の影響もまた無視できることが分かった。これらの結果から原子力災害後の周辺に ^{137}Cs が飛散し沈着している環境下でも、XRF 分析による U の測定が充分精度良く行うことが可能であると明らかになった。



蛍光 X 線分析装置模式図