



東邦大学

2025 年度

東邦大学大学院理学研究科物理学専攻

修士論文予稿集

修士論文発表会

2026 年 2 月 19 日(木)

---

$\beta^-$ 崩壊に伴う核刺激脱離を用いた反跳イオンビーム生成

氏名 飯田 栞吏 (原子過程科学教室)

ウラン (原子番号  $Z=92$ ) より原子番号の大きな超ウラン核領域では, 中性子数  $N=184$  の球形閉殻付近で半減期 100 年を超える「安定の島」の存在が予測されている[1]. この性質予測の精度向上のためには, 超ウラン核領域の核構造の理解を深めることが重要である. 中でも, 中性子数  $N=152$  における変形閉殻構造が理論的に示唆されているが, 実験的には合成の困難さから数核種確認されているのみに留まる [2].

近年, 超ウラン核の合成に一般的に用いられる核融合-蒸発反応では合成不可能な中性子過剰核の合成が期待される多核子移行 (MNT) 反応と, 多重反射型飛行時間式質量分析器を組み合わせることにより, これまで困難とされていた  $N=152$  近傍の核構造研究が可能となった[3]. 我々は, 変形閉殻構造の低  $Z$  側終端と考えられる  $^{246-248}\text{Am}$  同位体の精密質量測定を目的として, MNT 反応で生成される測定対象イオンの生成・輸送方法の検討を進めている. 本測定では, MNT 反応で同時生成される測定対象核種と同質量数をもつ同重体がスペクトル干渉を引き起こし, 精密質量測定妨げとなり得る. この干渉を低減する手法として,  $\beta^-$ 崩壊親核をヘリウムガス中で減速し電極上に捕集した後,  $\beta^-$ 崩壊の反跳により娘核イオンを電極表面から脱離させる核刺激脱離 (NSD) [4]を用いたイオンの取り出しに着目した. 本手法を適用する上では, 反跳運動量が小さく連続的な  $\beta^-$ 崩壊における NSD 効率とイオン生成が重要な条件となる.

本研究では, 条件最適化のために,  $^{229}\text{Th}$  崩壊系列の  $\beta^-$ 崩壊核種  $^{225}\text{Ra}$  に着目し, 娘核である  $^{225}\text{Ac}$  の  $\alpha$ 線測定から異なる表面状態とガス圧の条件のもとで NSD 効率を評価した (下図). その結果, 捕集電極表面の平滑性が NSD 効率に重要な役割を果たすことが明らかとなった. さらに, 反跳時のガス圧が脱離後のイオン輸送に大きく影響することが示された. この結果は, ガス衝突による電極表面への出戻りを考慮して補正した NSD 効率がガス圧に依らないことから裏付けられる. 最大の NSD 効率は, 高い平滑性を有する捕集電極を用いた条件下で  $1 \times 10^{-3}$  程度が得られた. 本研究で得られた NSD 効率をもとに,  $^{246-248}\text{Am}$  同位体に対する NSD 効率の推定が可能となり, 実際の精密質量測定実験において十分な収量が見込まれることが示された.

[1] W.D. Myers and W.J. Swiatecki, *Nucl. Phys.* **81**, 1 (1966).

[2] Y. Ito *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 152501 (2018).

[3] T. Niwase *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **130**, 132502 (2023).

[4] I. Kelson *et al.*, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **27**, 1087 (1994).

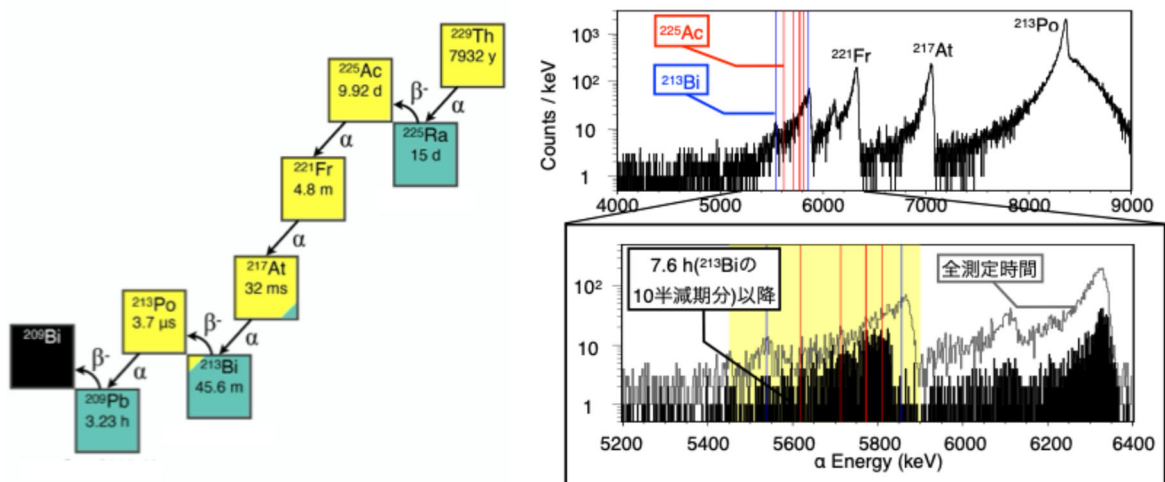


図:  $^{229}\text{Th}$  崩壊系列と測定で得られた  $\alpha$ 線スペクトル. 黄色で示した領域は,  $^{225}\text{Ra}$  の  $\beta^-$ 崩壊に伴う NSD で生成・輸送された  $^{225}\text{Ac}$  からの  $\alpha$ 線エネルギー範囲に相当.

## 溶液中微量ウランの高感度蛍光 X 線分析

氏名 柳澤 右京 (原子過程科学教室)

核燃料物質取扱施設等で事故が発生した場合、ウラン (U) などの核燃料物質が漏洩し、事故現場周辺を汚染することが危惧される。このような事故発生時には、作業者の安全確保や事故の状況解明、対処方針策定のため、汚染状況を調査する必要がある。U の同位体は総じて長い半減期を持つため、単位質量あたりの放射能が低く、放出される  $\alpha$  線による放射線計測法での微量分析は困難である。そこで、微量ウラン分析法として、原子数を測定対象とする蛍光 X 線 (X-ray fluorescence :XRF) 分析法に注目した。XRF 分析法は、X 線を試料に照射して試料から放出される特性 X 線の一種である XRF を測定する手法である。

環境水の U 汚染では、土壌等の成分が混在することや U 濃度が低いことが想定される。土壌、岩石等に豊富に含まれるストロンチウム (Sr) は、U の XRF 分析に用いるスペクトルピーク位置の近傍に大きな XRF ピークを形成するため U の XRF 分析が妨害される。このため、Sr の影響を防ぐ必要がある。また、低濃度溶液試料の対象とする XRF 分析では、吸着材を用いて溶液中から測定対象元素を吸着、捕集して分析する手法や、高感度分析可能な全反射蛍光 X 線 (Total Reflection X-ray fluorescence :TXRF) 分析法が有効である。しかし、吸着材で吸着、捕集する方法には微粒子状の吸着材を用いる際に U 付着吸着材が散逸するリスクの問題があり、TXRF 分析法には試料溶液のごく一部のみが分析に供されるという問題がある。これらの問題を解決することにより、更なる高感度化が可能と期待される。

本研究では、まず、ピーク分離によって U からの信号のみを取り出すフィッティング関数を構築し、Sr の影響を除去することに成功した。高感度分析のための吸着材を利用した手法については、磁性吸着材を用いることで、U 付着吸着材を磁力で制御し、捕集した U の飛散を防ぎ、従来よりも安全に分析できる手法の開発を行った。更に TXRF 分析法については、試料作製用ガラス基板の新規加工法を開発し、従来 10  $\mu\text{L}$  程度しか利用できなかった試料溶液が 1 mL まで使用できるようになった。その結果、約 100 倍の検出感度向上を成し遂げた。

本研究により、これまでよりも安全、安定に試料溶液中の U の高感度な XRF 分析を行うことが可能な技術を開発することができた。これらは、原子力事故対応を含む環境放射能分析の分野において重要な技術となりうると考えている。

## Aサイトの化学不定比性を利用した $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ ( $R = \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ ) の電子相制御

濱井徳晴 (磁気物性学教室)

ペロブスカイト型 Mn 酸化物は超巨大磁気抵抗 (CMR) 効果を示すため大きな注目を集めている [1]。CMR 効果は通常、強磁性金属相 (FM 相) と電荷・軌道秩序絶縁相 (COOI 相) の相境界近傍で観測される。希土類元素  $R$  と Ba が層状に規則配列した秩序型ペロブスカイト構造をもつ  $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$  は、FM 相と COOI 相の両相が室温以上で存在するため [2]、CMR 効果を利用した新しい磁気デバイス材料の候補物質として期待されている。しかしながら、 $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$  の COOI 相は磁場に対して非常に堅牢であるため、磁場誘起の COOI-FM 転移 (すなわち CMR 効果) は発現しない。CMR 効果を発現するには化学置換による電子ドーピングを利用して FM 相を安定化 (COOI 相を不安定化) する必要がある。

$R\text{BaMn}_2\text{O}_6$  の Ba サイトに希土類元素を置換 (電子ドーピング) することで、室温で CMR 効果が発現することが過去に報告されている [3]。しかし、報告された CMR 効果 (磁場誘起 COOI-FM 相転移) の磁気抵抗変化は著しくブロードであった。その原因として、希土類置換によって Ba 層に生じたクーロンポテンシャルの乱れが考えられる。

当研究室では、化学置換以外で  $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$  の FM 相を安定化する方法として、Ba サイトの欠損 (化学不定比性) が有効であることを明らかにしている [4]。しかし、 $R = \text{Nd}$  以外の  $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$  試料では欠損効果は調べられておらず、また、欠損により FM 相が安定化する理由についてもまだ不明である。そこで本研究では、A サイト ( $R$  サイト、Ba サイト) の化学不定比性を利用して  $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$  ( $R = \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ ) の電子相制御を試みた。その結果、Ba 欠損の効果を一層明らかにすることができた。

X 線構造解析により、Ba 欠損した  $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$  (組成式:  $\text{PrBa}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_{6-\delta}$ ) は  $x = 0-0.15$  で秩序型ペロブスカイト構造を持つことを確認した。母物質である  $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$  は 304 K で FM 相に転移、254 K で A 型反強磁性 (AAF) 相に転移し、その基底状態は AAF 相である。磁化測定の結果、Ba 欠損による FM 相の温度域の拡大 (FM 相転移温度の上昇、AAF 相転移温度の低下) が確認された (図 1)。 $x = 0.10$  においてシャープな磁場誘起 AAF-FM 転移、そして、その磁場誘起相転移にともなう 2 桁程度の電気抵抗率の減少 (CMR 効果) を観測した。磁場誘起相転移がシャープなのは、Ba 層にクーロンポテンシャルの乱れがないためであると考えられる (ただし、Ba 欠損による構造的乱れは存在する)。 $\text{PrBa}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_{6-\delta}$  のヨウ素滴定の結果から、Ba 欠損量の増加にともない Mn の平均価数が低下することがわかった。以上の結果は、Ba 欠損がクーロンポテンシャルの乱れをとまなわない電子ドーピング法であることを示している。

Ba 欠損量を  $x = 0.10$  に固定した  $\text{Nd}_{1-y}\text{Sm}_y\text{Ba}_{0.9}\text{Mn}_2\text{O}_{6-\delta}$  ( $y = 0-1$ ) 試料の磁化測定も行った。 $y = 0.25-1$  で COOI 転移温度は室温以上であったが、FM 相は現れなかった。 $y$  の低下とともに COOI 転移温度は低下し、 $y = 0$  で FM 相が現れた。これらの結果は、 $\text{Nd}_{1-y}\text{Sm}_y\text{Ba}_{0.9}\text{Mn}_2\text{O}_{6-\delta}$  においては  $y = 0.25$  と  $y = 0$  の間に多重臨界点が存在していることを示している。

本研究で得られた知見は、CMR 効果を利用した磁性材料開発の重要な手掛かりになると期待される。

[1] Y. Tokura, Rep. Prog. Phys. **69**, 797–851 (2006).

[2] D. Akahoshi, et. al., Phys. Rev. B **70**, 064418 (2004).

[3] T. Nakajima and Y. Ueda, J. Appl. Phys. **98**, 046108 (2005).

[4] 服部央弥, 令和 6 年度東邦大学理学研究科物理学専攻終了論文。

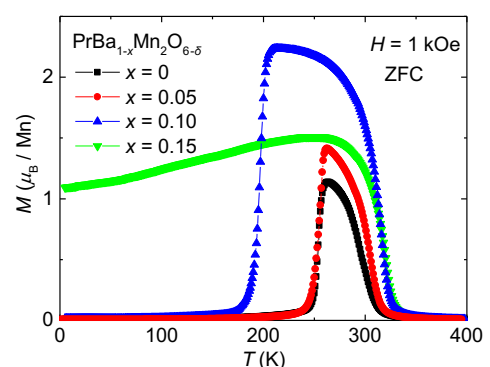


図 1  $\text{PrBa}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_{6-\delta}$  ( $x = 0-0.15$ ) の磁化の温度依存性

## 超微粒子原子核乾板を用いた暗黒物質直接探索のための 酸化反応を用いたノイズ低減手法の開発

石原 大樹（素粒子物理学教室）

### 要旨

暗黒物質は様々な観測結果からその存在が示唆されているものの、未だ直接検出に至っていない。はくちょう座や銀河中心方向から到来するとされる暗黒物質を検出する方向探索実験では、生成される飛跡が極めて短いため、高い分解能を有する検出器が要求される。超微粒子原子核乾板 (Nano Imaging Tracker : NIT) は暗黒物質直接探索用に独自開発された固体飛跡検出器であり、数百 nm レベルの高い位置分解能を実現している。しかし、NIT では現像過程において偶発的に発生する現像銀(Fog)が存在し、通常の Fog の水準であっても、背景事象として飛跡解析の妨げとなり得る。そのため、Fog をこの通常水準を下回る程度まで安定して低減する手法を確立することが課題であった。

そこで、本研究では現像後に Fog を低減する手法を新たに提案する。荷電粒子起因の現像銀がフィラメント構造をとるのに対し、Fog の現像銀は単純な構造をとることで、酸化反応速度に差が生じる可能性に着目した。現像銀を酸化させる溶剤(減力剤)として、ヘキサシアニド鉄(III)酸カリウム(赤血塩)を含んだ溶液を採用した。

まず、減力剤の原理実証実験として、 $^{252}\text{Cf}$ 中性子線源を用いた照射実験を行い、陽子反跳飛跡について評価を行った。各赤血塩濃度に対して、陽子反跳飛跡は高い割合で維持され、Fog は、処理条件に応じて変動し、低減する傾向が確認された。以上の結果から、Fog と荷電粒子起因の飛跡における現像銀粒子の酸化反応速度に差があることが示された。

次に、産業技術総合研究所の単色中性子ビームを用いて、実際の暗黒物質探索に近い条件下で減力処理の評価を行った。特定の赤血塩濃度の減力剤で処理をしたサンプルを既存の解析に加え、新たな画像解析手法を構築し、解析に適用した。その結果、未照射サンプルでは Fog が劇的に低減し、中性子照射サンプルでは事象超過が確認された。これらの事象から一定以上の長さを持つ陽子反跳飛跡が確認され、さらに Geant4 シミュレーションとの比較から、陽子反跳飛跡に対する検出効率を評価した。

これらの結果から、現像銀の酸化反応を用いた Fog の新たな低減手法の有用性を示した。

## 高輝度イメージングを目的とした PQ 系溶解物理現像の基礎特性の評価

染谷 一輝（素粒子物理学教室）

## 要旨

NEWSdm (Nuclear Emulsion for WIMP Search – directional measurement) 実験は、超微粒子原子核乾板 NIT (Nano Imaging Tracker) を用いて、暗黒物質直接探索における反跳核の方向情報取得を目指す。暗黒物質探索では低エネルギー領域ほど事象数が増加すると考えられるため、観測エネルギー閾値の低減は検出感度向上に直結する。一方で、NIT は結晶サイズが小さく高い空間分解能が期待できる反面、低エネルギー飛跡では像が低輝度となり、画像解析における grain 認識効率の低下や飛跡再構成の不確かさが課題となる。したがって、低エネルギー領域での飛跡視認性を改善する現像手法の確立は重要である。

NIT で用いられてきた従来現像液 (MAA) では、潜像核を増幅して現像銀粒子 (grain) を形成するが、飛跡の光学的見え方は現像銀の大きさ・形状・表面状態に強く依存する。本研究では、ハロゲン化銀結晶を溶解させながら現像を進めることで現像銀の肥大化と高輝度化が期待できる「溶解物理現像」に着目した。PQ 系溶解物理現像液 GS-1 を基に、 $\gamma$  線バックグラウンドに対する感度を指標としてフェニドン量を調整した現像液 GS-1 を作製し、NIT に適用した。

GS-1 の有効性を検証するため、低エネルギー proton を常温の NIT に直接照射した試料を用い、従来の MAA 現像液と GS-1 現像液で現像し比較した。現像後の乾板は自動光学顕微鏡システム PTS-3 によりスキャンし、飛跡候補を再構成した。評価では、飛跡を構成する grain 像の光学輝度 (視認性) に着目するとともに、再構成された飛跡の角度情報に基づいて角度検出能力を整理し、現像液の違いが proton の検出性能に与える影響を比較評価した。図 1 に 100 keV proton 照射試料の顕微鏡像を示す。

以上の評価から、溶解物理現像 (GS-1) の適用は proton 飛跡の視認性および再構成に改善をもたらす一方、低温条件では感度不足により検出効率が低下する課題が明確となった。したがって、低温下での現像反応を考慮した処方・条件の最適化が今後の主要課題である。本研究は、MAA との比較および PTS-3 による再構成結果に基づき、現状の GS-1 現像液が示す proton 検出特性を整理し、改善に向けた評価基盤を与えた。

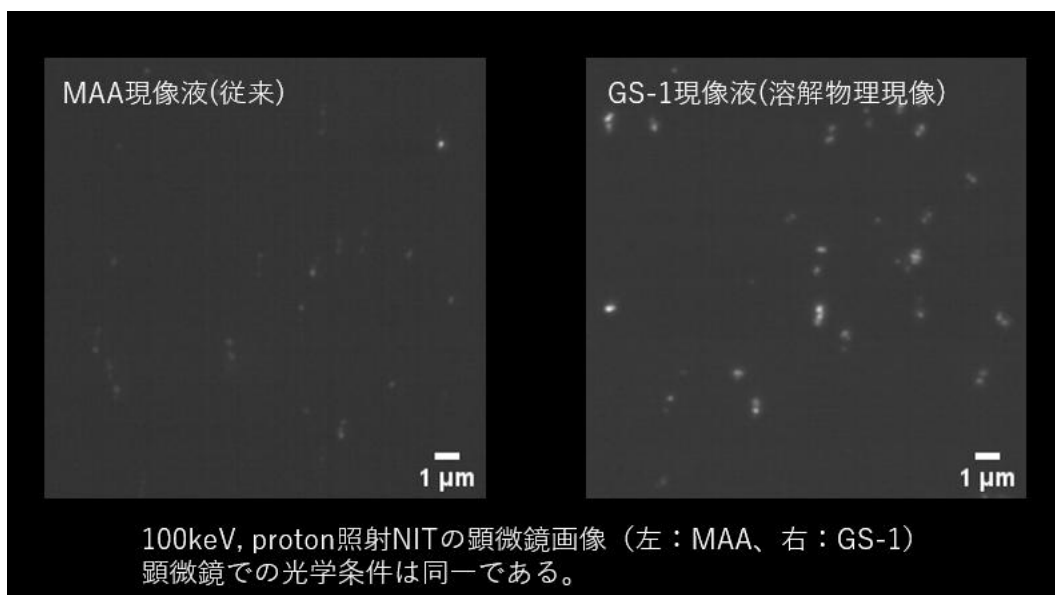


図 1 : 100 keV proton 常温照射 NIT の顕微鏡像 (左 : MAA, 右 : GS-1)。

有機導体 $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Clの超伝導状態における非相反伝導現象

布施晴輝（物性物理学教室）

電流の向きによって電気抵抗の値が異なる整流現象は、半導体の pn 接合などを用いてエレクトロニクスに利用されている。しかし、均一な物質であっても空間反転対称性と時間反転対称性が破れていれば整流現象が生じることが知られており、非相反伝導現象と呼ばれ注目を集めている。電流の向きによる電気抵抗の違い(非相反抵抗)は通常の電気抵抗と比べて非常に小さいため、スピン軌道相互作用が大きい無機物質を中心に研究されてきた。しかし、超伝導体で非相反抵抗が巨大化することが報告されたことから、スピン軌道相互作用が小さい有機超伝導体など様々な超伝導体での観測が期待され、新たな物性測定の手段として期待されている。実際にキラルな結晶構造を持つ有機超伝導体 $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu(NCS)<sub>2</sub> (以下、 $\kappa$ -NCS)において非相反伝導現象が観測されているが、キラルな結晶構造を持つ有機超伝導体はほとんどない。しかし、バルクでは空間反転対称性が破れていない物質でも、界面では対称性が破れ、非相反抵抗が生じることが知られている。本研究では、非キラルな有機超伝導体においても非相反伝導現象を観測することを目的として、有機導体 $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Cl (以下、 $\kappa$ -Cl)の薄片状単結晶を基板に貼り付け、界面での空間反転対称性の破れから生じる非相反伝導現象の観測を試みた。

基板上的 $\kappa$ -Clは約 10 K で超伝導転移を起こし、その状態で面内磁場下の電気抵抗の高調波成分を測定したところ、先行研究と同様に超伝導転移温度付近で非相反抵抗が観測された(図1)。非相反伝導の大きさを示す非相反係数は、電界制御されたMoS<sub>2</sub>などの無機物質の超伝導体の値に匹敵した。

しかし、複数の電極を用いて試料内の電位分布を調べると、観測された非相反抵抗は界面における空間反転対称性の破れだけでは説明が難しいことがわかった。そこで熱磁気効果(ネルンスト効果)に着目し、温度勾配の異なる状況で測定を行ったところ非相反抵抗にも顕著な違いが現れた。このことは、超伝導状態で増大するネルンスト効果が、非相反抵抗の測定に影響を与えてしまうことを示している。その一方で、温度勾配を意図的に導入することで非相反係数が増大することも期待される。実際にレーザー加工を用いて試料を意図的に非一様な形状にすると、非相反係数を約 2 倍に増加させることが出来た。

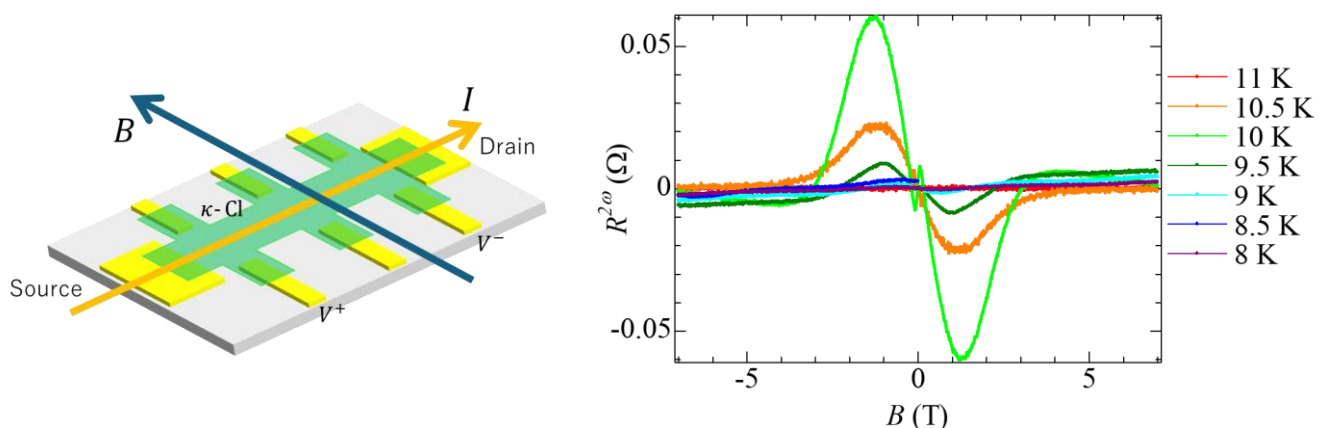


図 1：超伝導状態の $\kappa$ -Clにおける非相反抵抗。超伝導転移温度(約 10 K)付近で非相反抵抗が観測された。

## 銀河団中の速度構造を考慮した鉄輝線共鳴散乱の数値解析

清水 大河 (宇宙物理学教室)

銀河団は宇宙最大級の自己重力系であり、その重力ポテンシャル中に存在する高温かつ希薄なプラズマ（銀河団ガス）は主に X 線を放射する。重元素イオンに由来する X 線輝線は、プラズマの温度や金属量に加えて、銀河団内部の速度構造や乱流運動の影響を受けるため、銀河団ガスの物理状態を探る重要な診断手段である。特に鉄輝線に代表される共鳴輝線に対しては、視線方向の光学的厚みが無視できない場合があり、共鳴散乱によって表面輝度分布や観測されるスペクトル形状が変化することが知られている。

近年、Hitomi 衛星、XRISM 衛星などによる高分解能 X 線分光観測によって、より高精度な観測データが得られ始めている。こうした観測精度の向上に伴い、共鳴散乱やドップラー効果を含む輻射輸送過程を適切に扱った数値解析の重要性は、これまで以上に高まっている。共鳴散乱の効果は、プラズマの密度・温度構造に加えて、熱運動や乱流、さらには銀河団全体としての系統的な速度場によるドップラー効果に強く依存する。一方で、銀河団ガスの膨張・収縮のような大域的運動が共鳴散乱と組み合わせられた場合に、観測される鉄輝線スペクトルにどのような非対称性や歪みが生じるのかについては、必ずしも十分に整理されていない。

本研究では、球対称な銀河団モデルを仮定し、共鳴散乱を含む輻射輸送方程式を数値的に解くことにより、銀河団ガス中の大域的な速度構造が鉄輝線スペクトルに与える影響を調べた。その結果、既存のインパクトパラメータ法の枠組みを保持したまま、銀河団ガスの膨張・収縮を含む系統的な速度場を輻射輸送計算に一貫して取り込むことが可能であることを示した。

一様球モデルを用いたテスト計算では、共鳴散乱と大域的な速度場が組み合わさることにより、単なる併進運動や乱流による線中心シフトや線幅増加とは異なる、非対称なスペクトル歪みが生じ得ることが確認された。

現実的な銀河団ガスの密度・温度プロファイルを考慮した場合にも、鉄輝線スペクトルに非対称な歪みが生じることが確認された。歪みの度合いは一定ではなく、乱流速度分散や温度分布、電子数密度分布などに依存して変化することが示された。

以上の結果から、観測される鉄輝線スペクトルの形状に含まれる歪みを解析することにより、銀河団ガス内部における膨張・収縮運動を検出し、その大きさに制限を与え得ることが示唆された。

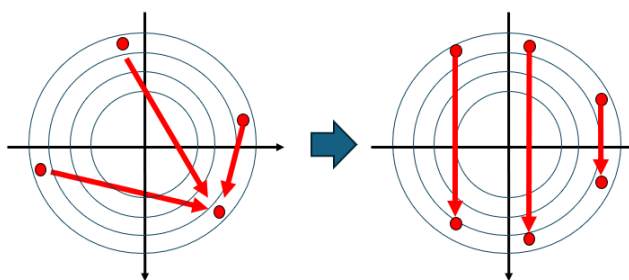


図 1 : 散乱過程の計算に用いたインパクトパラメータ法の概念図

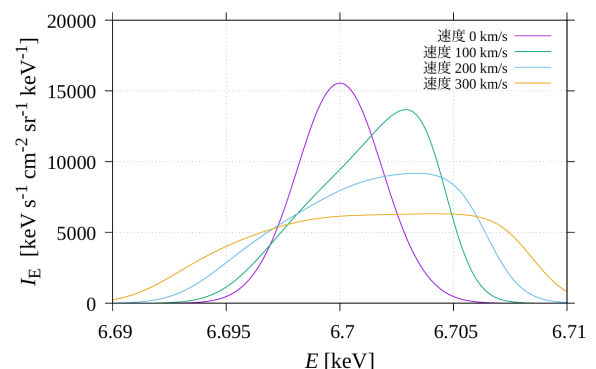


図 2 : 銀河団の収縮に伴う He 型鉄輝線スペクトルの歪みの一例

## 微弱で広がった天体に対する 2 次元フーリエ空間での電波干渉計データ解析

関口 颯樹 (宇宙物理学教室)

電波干渉計は、天球面上における天体の輝度分布を 2 次元フーリエ変換した量（ビジビリティ）を測定する観測装置である。長所は高分解能と高感度を両立する点である一方、2 次元フーリエ空間内のすべての点を網羅することは現実的に不可能であるため、輝度分布の完全な復元が困難であることが短所である。特に、現行の電波干渉計の多くは高空間分解能を実現するために建設されたため、広がった構造の把握が不得意である。

伝統的な解析方法（例、CLEAN 法）は、データのない領域を内挿や外挿などの補完によって埋め、逆フーリエ変換をして天球面上の模擬的な輝度分布を用いて解析する方法である。しかし、模擬的な輝度分布は補完の仕方に依存する、データ誤差が混ざり合ってしまうなどの短所がある。そこで本研究では 2 次元フーリエ空間で直接解析するコードを開発した。これによって補完は必要なくなる、データ誤差はそのまま使えるなど、伝統的方法の短所が改良できることが期待される。実際、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いた解析コードを開発し、結果 10 個以上のモデルパラメータの同時フィッティングに成功した。

さらに開発したコードを用いて、Atacama Large Millimeter/submillimeter Array Band1 によって取得された銀河団 RXJ1347.5-1145 を対象とした観測データを解析した。この天体はコンパクトな構造と、スニヤエフ・ゼルドビッチ効果、電波ハロー（1.4 GHz 以下）という広がった構造をもつ。結果として、周波数チャンネルごとに輝度分布をフィッティングするコードを開発することができた。上記のデータを解析すると、活動銀河核、電波銀河に加えて、スニヤエフ・ゼルドビッチ効果を検出することができた。たとえば、最低周波数のチャンネル（35.3 GHz）においては半値全幅で 40"~50"程度の広がりをもつことがわかった。電波ハローは検出されなかったが、観測帯域（35 GHz~50 GHz）よりも低周波側にカットオフが存在するためであると考えられる。

今後の課題として、周波数方向のモデルも含めたコード開発を行う。そして上記のデータに対してスニヤエフ・ゼルドビッチ効果のスペクトルフィットから、熱的電子の圧力を得ることを目指し、X 線観測から得られる密度の情報と組み合わせ、銀河団ガスの進化について調べたい。また、さらにその先の展望としては、ノンパラメトリックな手法による解析コードを開発し、たとえば Square Kilometer Array の試験機 MeerKAT などのデータ解析に応用することを計画している。

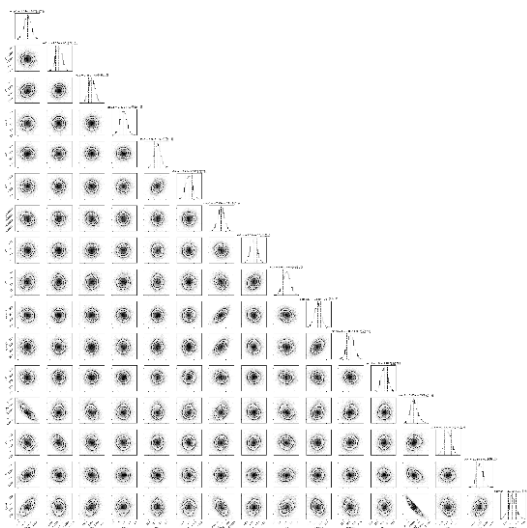


図 1 : マルコフ連鎖モンテカルロ法による 16 パラメータのフィット結果

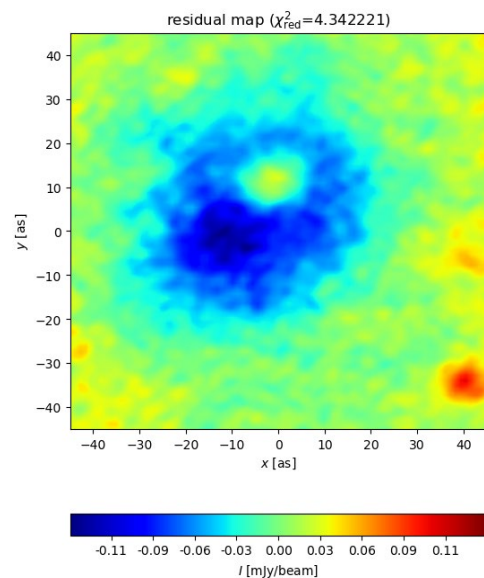


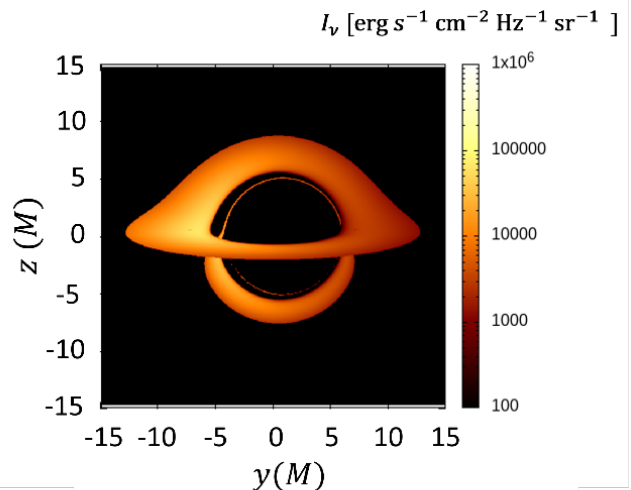
図 2 : 活動銀河核成分を差し引いた後の輝度分布 (ALMA による実データ)

## カー・ブラックホール時空における ray-tracing code の開発

角田 侑己 (宇宙物理学教室)

2019年にイベント・ホライズン・テレスコープの電波観測によりブラックホールの直接撮像に初めて成功した。ブラックホールは光子を放出しないため周囲から放出される光子を観測する。その結果ブラックホールが存在する領域は、暗い影のように見え、この暗い影はブラックホールシャドウと呼ばれる。ブラックホールシャドウの形や大きさは、ブラックホールが持つ物理量により決まるため、ブラックホールの画像からそれらの物理量を推定できると期待される。本研究の対象であるカー・ブラックホールの場合には質量と角運動量を推定できると考えられる。ブラックホールが角運動量を持つと周囲の時空を引きずる。その結果、ブラックホール近傍の光子の軌道が曲げられてブラックホールシャドウの形状に影響を与える。そのためブラックホールシャドウについて調べるには、ブラックホール周りの光子がどのような運動をするのかを明らかにする必要がある。ブラックホール近傍の光子の軌道が明らかになり、ブラックホール周りの時空構造についても理解が進む。そのため、ブラックホールシャドウについて調べると強重力理論の検証も可能になる。実際にブラックホールシャドウから物理量を得るためには、光子の軌道を記述する測地線方程式を数値的に解き、理論的なモデルと観測結果を比較する必要がある。そこで本研究では、カー・ブラックホール時空における測地線方程式を解くコードを構築し、光源を仮想的な光子円盤にした場合と実在する光学的に厚い降着円盤にした場合に形成されるブラックホールシャドウの画像を作成するとともに、そこから得られる情報をもとに角運動量の推定方法を提案することを目的とする。

仮想的な光子円盤を光源とした場合、ブラックホールシャドウの輪郭部分である光子リングが角運動量の増大により円形から歪むことが明らかになり、その歪みを光子リングの半径の比として定量的に評価することができた。また、光源を実在する降着円盤にした場合、降着円盤から光子が放出された後、観測者に届くまでに重力赤方偏移や相対論的ドップラー効果を受けるため、観測者に近づく向きに運動する円盤中の粒子から放出される光子は明るく、観測者に遠ざかる向きに運動する円盤中の粒子から放出される光子は暗くなり、形成されるブラックホールシャドウ像の輝度分布に非対称性が生じることが分かった。以上の数値計算の結果から、ブラックホールシャドウの画像を作成できた、そこで角運動量の推定方法を次のように提案する。仮想的な光子円盤の場合、形成された光子リングが赤道面上の画像の中心からどれだけの距離にあるかを求め、その大きさを比較し角運動量を推定する。一方で、降着円盤の場合は得られたブラックホールシャドウの像の輝度の総量の非対称性から角運動量を推定する。



$\alpha = 0.5$  のブラックホールシャドウ

## HLLD 法と constrained transport 法に基づく理想磁気流体方程式の計算コードの開発

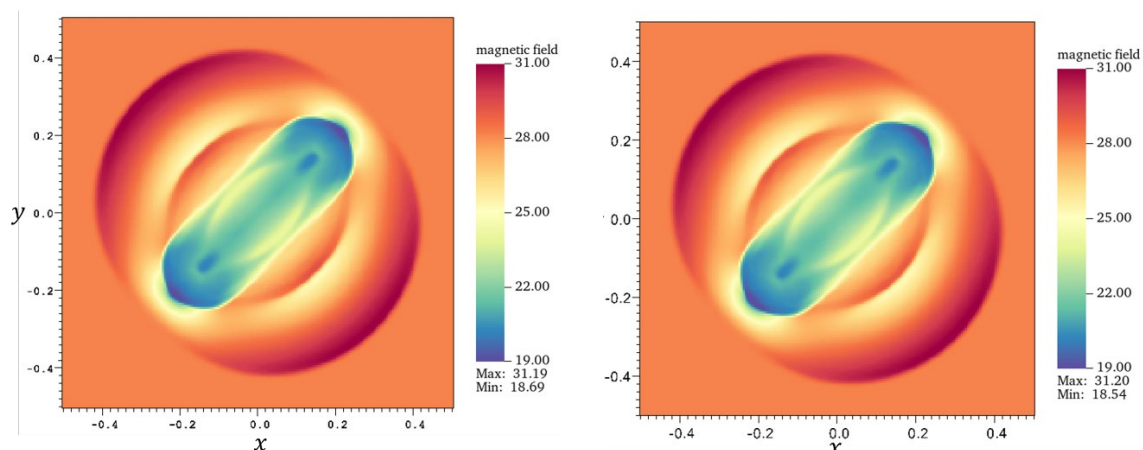
若林 佑哉 (宇宙物理学教室)

磁場は宇宙で起こる現象を理解する上で、重力と並んで重要な存在である。特に、磁場は、磁力線に沿ってガスを運動させること、またガスの運動エネルギーを磁気エネルギーに変換して、磁力線に沿って伝えることができるため、降着円盤からの回転エネルギーの抜き出しや、極超新星爆発における衝撃波のエネルギーの輸送などにおいて、特に重要である。このような高エネルギー現象を扱う上では、磁気流体 (MHD) による計算が必要となる。その際、宇宙では電気抵抗の影響が小さいことから、抵抗を無視した理想 MHD 方程式を用いて、調べることができる。

理想 MHD 方程式を用いて天体シミュレーションを行うことができる公開コードとして、Athena++ や CANS+などが開発されており、これらを使用して研究することは一つの選択肢である。しかし、MHD の数値計算では、使用するスキームに起因した数値散逸が存在し、この数値散逸が非物理的な結果をもたらす可能性もある。そのため、スキームの特性を理解することが重要となる。以上を踏まえ、本研究では理想 MHD 方程式を扱う計算コードを開発し、理想 MHD 方程式で使用されるスキームの特性について調べた。

本研究では保存則を満たすため、流体方程式の離散化に有限体積法を採用し、磁束の保存を満たすため、誘導方程式の離散化には constrained transport(CT)法を採用した。流体保存量の流束と電場の計算では、波の移流も考慮する必要がある。流束の計算手法として、すべての特性波を捉えることができる Roe 型スキームがあるが、このスキームは、MHD のように特性波の縮退が起こる系において、複雑な扱いを必要とする。そのため、本研究では、Harten - Lax - Leer(HLL)型スキーム、特に HLL 法と HLLD 法を採用した。電場の計算には、HLL 型スキームに基づく電場評価が可能な upwind constrained transport 法を採用した。空間高精度化には MUSCL 法を、時間積分には 4 次精度の古典的ルンゲクッタ法を用いた。

開発したコードを用いて 1 次元衝撃波管問題を計算し、HLLD 法が HLL 法よりも Alfvén 波とスロー磁気音波を鋭く捉えていることがわかった。また、多次元問題の計算では HLLD 法を用いて計算し、磁束の保存が満たされていること、また、3 次元においても波を捉えていることを確認した。加えて、Athena++との比較を行い、同様の結果が得られることを確認した。



(a) 本研究で開発したコードを使用

(b) Athena++を使用

図 1 : 3 次元 blast wave 問題に対する磁場の計算結果の比較:(a) 本研究で開発したコードにより得られた磁場の大きさ  $|\mathbf{B}|/\sqrt{4\pi}$  の分布. (b) Athena++ (Stone et al. 2020) を用いた計算で得られた磁場の大きさ  $|\mathbf{B}|/\sqrt{4\pi}$  の分布.  $\mathbf{B}$  は Gauss 単位系の磁場である.

## デュアルコム分光を用いた高精度非接触ガス温度計測技術の開発

武子 尚生 (量子エレクトロニクス)

近年、高精度なガス温度計測は産業分野や燃焼プロセス、反応化学において極めて重要である。特に燃焼場のような気体の温度計測技術が求められるケースでは、従来用いられる放射温度計や赤外サーモグラフィの適用が困難である。そのため、非接触なガス温度計測では波長可変レーザー吸収分光 (TDLAS) に基づくガス温度計測が広く用いられている。しかし、TDLAS では圧力や濃度校正、観測するスペクトルの選定がガス温度の測定精度を制限している。一方、デュアルコム分光法 (DCS) は、短時間で広帯域スペクトルを高分解能で取得可能な分光法のため、様々な応用が期待されている。DCS を用いたガス温度計測は Rotational-state Distribution Thermometry (RDT) として  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  ガスに対して実証されている。RDT は Boltzmann 分布に基づく理論モデルに吸光度スペクトルの各線中心吸光度を Fitting することにより、キャリブレーション不要かつ複数吸収線を用いることによる高いロバスト性を有する。しかし、RDT は  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  ガスに特化しており、他分子への適用が困難であった。以上より、分子の適用可能範囲を拡大した新たなガス温度推定モデルを開発する必要がある。

本研究では、これらの課題を解決する新たなガス温度推定モデルとして Integration Log RDT (ILRDT) を提案する。提案モデルでは、分子の温度依存性を吸収スペクトルの面積、すなわち積分吸光度に基づいて定式化することでガス温度の推定を可能にしている。また、対数変換を用いることで線形 Fitting を可能にし、測定のロバスト性を向上させている。提案手法の有効性を示すため、近赤外光領域に吸収を持つ  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  ガスおよび  $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$  ガスのガス温度同時計測を実証した。

Fig.1 に示すのは、本研究で用いた位相同期デュアルコム分光システムである。自作の繰り返し周波数 100 MHz Er ファイバコムを 2 台用いたシステム構成であり、各コムは Er 添加光ファイバ増幅器 (EDFA) によって、十分に広帯域化されている。参照温度測定のため、それぞれのガラスセルに校正済みの白金測温体 (Pt100, class A) を設置した。解析に必要な信号対雑音比 (SNR) を確保するために積算時間 25 s で透過スペクトルを取得した。透過率スペクトルの取得には簡易規格化手法を用いており、各ガスの分子スペクトルを取得するために差分処理を適用した。観測した各吸収線から積分吸光度を算出するために Voigt 関数を用いて Fitting した。取得した積分吸光度を対数変換により線形化した後、線形 Fitting により傾きを算出した。Pt100 により計測された温度  $293.1 \pm 0.1$  K に対して ILRDT により推定された  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  および  $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$  のガス温度はそれぞれ  $293.0 \pm 1.6$  K,  $292.8 \pm 1.4$  K と推定され、相対不確かさ 0.6% 以下で非接触多成分ガス温度計測を実証した (Fig.1(b))。本手法は、複数分子に対して同一手法で高精度なガス温度推定が可能であることを示している。

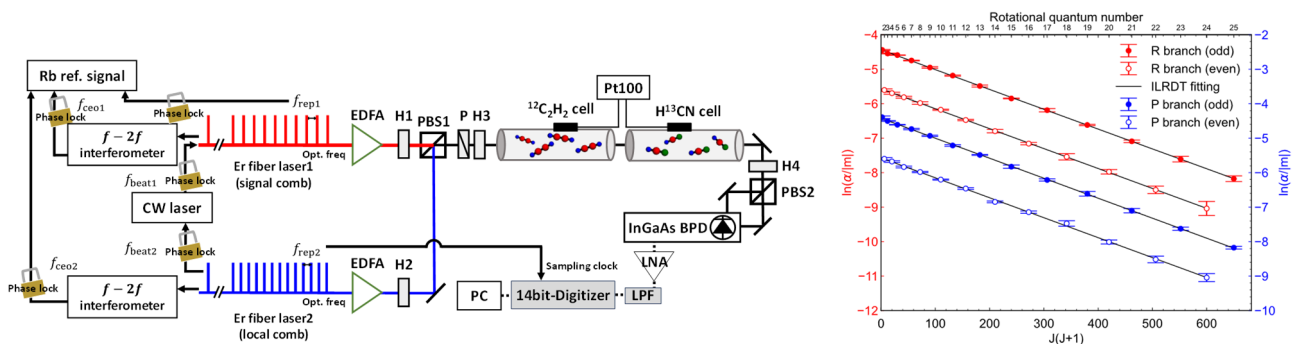


Fig.1(a) Phase-locked dual-comb spectroscopy system., (b) ILRDT fitting of  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ .

## 非線形性増大による共振器内での広帯域コム直接発生と自己遅延ヘテロダイン測定によるスペクトル線幅評価

吉岡 拓馬 (量子エレクトロニクス教室)

光周波数コムは、広帯域なスペクトル範囲にわたり等間隔に多数の周波数モードが配列した光源であり、原子や分子分光をはじめとする精密光計測において極めて重要な役割を果たしている。光周波数コムの繰り返し周波数とキャリア・エンベロープ・オフセット周波数を安定化することで、精密な光周波数の「ものさし」として機能する。レーザー開発の歴史においても、光周波数コムのスペクトル帯域幅の拡大は、多波長域にわたる分光計測や光周波数計測を実現するための重要な研究課題として位置づけられてきた。

従来、広帯域周波数コムの生成には、レーザー共振器外部において高非線形ファイバと光増幅器を組み合わせた構成が広く用いられてきた<sup>1)</sup>。しかし、この手法ではシステムが複雑化・大型化するという課題がある。一方、固体モード同期レーザーにおいては、非線形光学効果を利用してレーザー共振器内で直接広帯域スペクトルを生成する技術が報告されている。この手法では、利得媒質とは別に非線形媒質をレーザー共振器内に組み込むことで非線形光学効果を増強し、レーザーの利得帯域幅を超える 600~1350 nm に及ぶ広帯域スペクトルが実現されている<sup>2)</sup>。さらに、レーザー共振器内で動作するラマン補助型広帯域モード同期レーザーの実証も報告されている<sup>3)</sup>。

本研究では、ファイバレーザー共振器内における非線形性、すなわち非線形位相シフトを増大させることで、広帯域光周波数コムを直接生成する手法を提案・実証した。具体的には、コア径の小さな 1  $\mu\text{m}$  用シングルモードファイバや高非線形ファイバを、光パルスエネルギーが最大となる共振器内の位置に挿入することで、非線形光学効果を効率的に増強した<sup>4)</sup>。その結果、1  $\mu\text{m}$  用ファイバを挿入した共振器において、出力分岐比 10% に調整したとき、半値全幅 67.8 nm、10 dB 幅 84.5 nm、出力分岐比を 60% に調整したときに、半値全幅 81.1 nm、10 dB 幅 93.0 nm の広帯域スペクトルを得た。挿入前の半値全幅 32.8 nm と 10 dB 幅 51.7 nm と比較して、広帯域化を確認した。このときの共振器構成を Fig. 1(a)、光スペクトルを Fig. 1(b) に示す。さらに、自己遅延ヘテロダイン法を用いた位相雑音測定を行い<sup>5)</sup>、レーザー共振器内の非線形性の増大に伴う光コムモードにおける周波数雑音をスペクトル線幅として定量的に評価した。その結果、非線形性の増大による周波数雑音の有意な劣化は認められないことを示した。自己遅延ヘテロダイン干渉計を Fig. 1(c) に、被測定レーザーの出力分岐比 10% における位相雑音パワースペクトル密度 (PSD) と光周波数雑音 PSD をそれぞれ Fig. 1(d) と Fig. 1(e) に示す。

- 1) J. C. Knight, et al., *Nature* **424**, 847 (2003).
- 2) R. Ell, et al., *Opt. Lett.* **26**, 373 (2001).
- 3) S. Kimura, S. Tani, and Y. Kobayashi, *Sci Rep.* **9**, 3738 (2019).
- 4) R. Uchiyama, Y. Nakajima, et al., *JJAP* **64**, 032004 (2025).
- 5) M. Wada, et al., *Meas. Sci. Technol.* **31**, 125012 (2020).

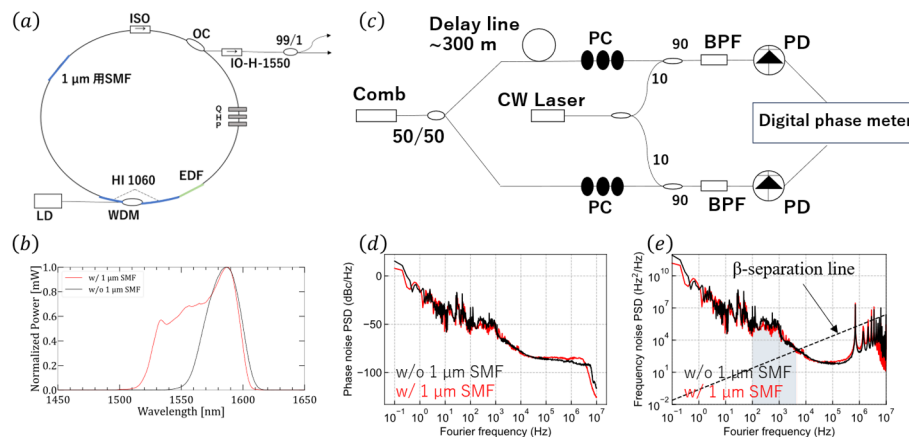


Fig. 1 (a) Experimental setup of the fiber laser. (b) Output spectrum. (c) Experimental setup of self-delayed heterodyne technique. (d) Phase noise PSD. (e) Frequency noise PSD.

## 磁化ダイナミクスを用いた機械学習の研究

鎌倉 秀飛（物性理論教室）

近年、人工知能(Artificial Intelligence : AI)分野において、機械学習における計算コストやエネルギー消費の増大が課題となっている[1]。

この課題に対するアプローチの一つとして、少ない計算コストで学習を行う手法であるリザーバーコンピューティング(Reservoir Computing : RC)が注目されている。リザーバーコンピューティングは時系列データ処理に適したネットワークであり、入力データを高次元空間へ変換するリザーバー(reservoir)とパターン認識を行うリードアウト(readout)から構成されている。学習におけるパラメータの更新はリードアウト部分のみで行われ、他の部分は固定して行われるため、膨大なパラメータ更新を必要とする他の学習手法と比較して低い計算コストを実現している。リードアウト部分以外のパラメータを固定するという特性から磁性やイオンのネットワークのダイナミクスをリザーバーとして利用することができる[2, 3]。このリザーバーコンピューティングの手法では、外部磁場を入力信号とし、それに対する磁化ダイナミクス応答を出力信号として利用している。磁化ダイナミクスの強い非線形性のため、出力層のみを線形学習することで時系列予測、判別を行うことができる。従来の大型計算機を用いたディープニューラルネットワークに比べ、計算コスト、消費電力を大幅に抑えることができるという利点がある。これまで、空間反転対称性の破れたスピン間の近接相互作用である Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用によって形成されるヘリカル構造やスキルミオン格子構造を用いて、リザーバーコンピューティングの可能性が示されてきた。

本研究では、スピン間の近接相互作用に加えて、長距離相互作用である双極子-双極子相互作用を有する磁性体の磁化ダイナミクスを用いたリザーバーコンピューティングの数値シミュレーションを行う。双極子-双極子相互作用が支配的な磁性体の系として、ニッケルをランダムに埋め込んだ磁性不純物膜を使用した。画像判別を行うために入力画像に対応した空間依存の外部磁場を印加した。磁化ダイナミクスは Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を解くことにより求め、各時刻における磁化の空間平均の値である時間依存性データを用いて線形学習を行った(図1)。

研究の結果、実測可能な磁化成分の空間平均を学習に用いて MNIST から提供されている手書き数字の判別が可能であることが示された。また、磁性不純物における不純物濃度や磁化の時間微分などでデータに前処理を加えることで、精度の向上が確認できた。最後に双極子間結合の有無によって判別精度が大きく変化し(図2)、双極子間結合が強く働く物質を用いた磁性不純物膜がリザーバーコンピューティングに適していることが示された。

[1] International Energy Agency (IEA), Energy and AI (IEA, Paris, 2025)

[2] W. Jiang, et al, Appl. Phys. Lett. 115, 192403 (2019).

[3] M.-K. Lee and M. Mochizuki, Phys. Rev. Applied 18, 014074 (2020).

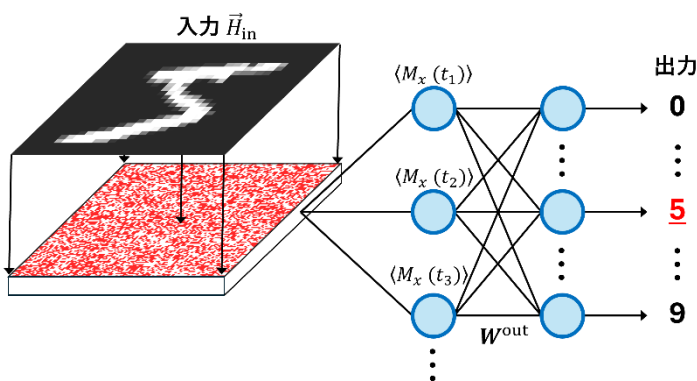


図1：学習ネットワークの概略図

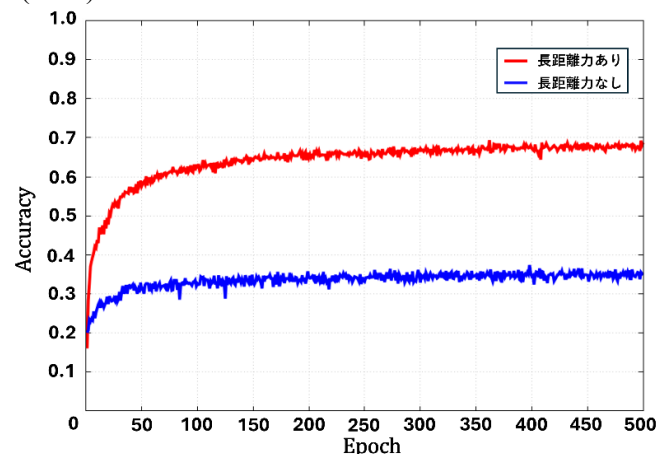


図2：長距離力の有無による判別精度比較