

2024 年度
大阪大学大学院理学研究科
物理学専攻・宇宙地球科学専攻
修士論文発表会予稿集

令和 7 年 2 月 12 日 (水)・13 日 (木)

目次

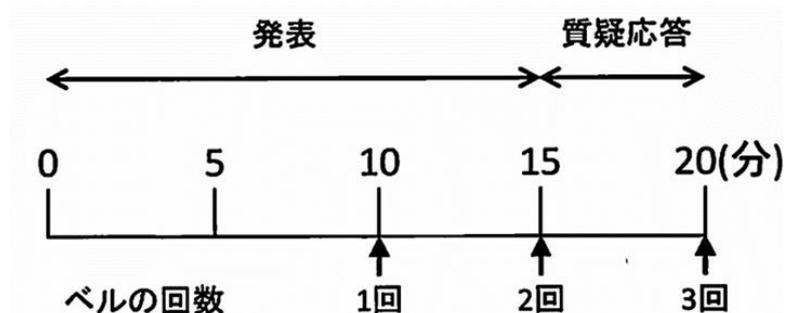
● 連絡事項	4
● タイムテーブル	6
● 予稿	
・物理学専攻 素粒子・原子核グループ (2月12日)	9
・物理学専攻 素粒子・原子核グループ (2月13日)	14
・物理学専攻 物性グループ (2月12日)	22
・物理学専攻 物性グループ (2月13日)	35
・宇宙地球科学専攻 (2月12日)	44
・宇宙地球科学専攻 (2月13日)	54

【連絡事項】

発表について

- 発表時間

ひとりあたりの持ち時間は、質疑応答5分を含めて20分です。



- 発表スライド・機器の準備

発表会ではZOOMを接続します。発表者1人1台のパソコンでも、各研究室でまとめて1台のパソコンでも、どちらでも構いません。原則、対面での発表会です。ただし、発表会当日体調不良等で会場に来ることができなくなった方のため、急遽オンラインでの発表に切り替える場合があります。ZOOMの接続方法は、後日メールで連絡します。

判定会議について

判定会議

日時：2月13日（木）16：00～

会場：H701

※教授、准教授、講師及び副査担当の助教の方は
全員出席です。

【タイムキーパーの方へ】

- 2月12日（水）、13日（木）の最初のタイムキーパーの方へ
講義室の開場、パソコンおよびプロジェクターのセッティングをお願いします。
詳細は別途。
- 2月12日（水）の最後のタイムキーパーの方へ
12日（水）の発表会終了後、13日（木）の最初のタイムキーパーの方に
 - ・コールベル
 - ・レーザーポインタ
 - ・タイムキーパー用の修論予稿集を紙袋に入れて渡してください。
- 2月13日（木）の最後のタイムキーパーの方へ
13日（木）の発表会終了後、
 - ・コールベル
 - ・レーザーポインタ
 - ・タイムキーパー用の修論予稿集を紙袋に入れて物理学専攻事務室（H408）に返却してください。

【緊急連絡先】

- 物理学専攻事務室（H408）：
續木佐知子（TEL：06-6850-5377, Ext：5377）
- 物理学専攻（松野研）：
稲村健臣、神田洸太、高藤大悟
- 宇宙地球科学専攻（近藤研）：
菅田竜太、中村虎太郎、松井亮介（Ext：5556）

【タイムテーブル】

素粒子・原子核グループ (会場：H701) 2月 12日 (水)

座長	開始時間	学生氏名	指導教員	ページ	進学	主査	副査	副査	副査	副査	副査	タイムキーパー
川畑	10:40	藤山 裕士	青木 正治			上野 一樹	青木 正治	増淵 達也				(青木研) 住村
	11:00	佐々木 涼花	青木 正治			上野 一樹	青木 正治	小田原 厚子				
	11:20	山田 千尋	青木 正治		○	青木 正治	上野 一樹	南條 創				
昼休憩												
大野木	13:00	泉尾 翼	南條 創			南條 創	増淵 達也	青木 正治				(南條研) 北野
	13:20	片山 舞	南條 創			南條 創	増淵 達也	上野 一樹				
青木	14:00	岩井 喬也	兼村 晋哉		○	兼村 晋哉	西岡 辰磨	佐藤 亮介				(兼村研) 斎藤
	14:20	東家 聖	西岡 辰磨		○	西岡 辰磨	兼村 晋哉	山口 哲				
	14:40	荒木 匠	大野木 哲也		○	大野木 哲也	西岡 辰磨	深谷 英則				

素粒子・原子核グループ (会場：H701) 2月 13日 (木)

座長	開始時間	学生氏名	指導教員	ページ	進学	主査	副査	副査	副査	副査	副査	タイムキーパー
西岡	9:00	渡辺 薫	福田 光宏			福田 光宏	川畑 貴裕	神田 浩樹				(浅川) 吉村
	9:20	西川 隆博	吉田 斉			吉田 斉	川畑 貴裕	嶋 達志				
	9:40	石谷 壮史	福田 光順		○	福田 光順	川畑 貴裕	小嶋 健児 (TRIUMF)	三原 基嗣			
休憩												
福田	10:20	LIN YIFAN	川畑 貴裕		○	川畑 貴裕	南條 創	古野 達也				(川畑研) 前里
	10:40	坂上 宗樹	川畑 貴裕		○	川畑 貴裕	青井 考	古野 達也				
	11:00	唐木 優河	藤岡 慎介		○	藤岡 慎介	有川 安信	青木 正治				
	11:20	松原 広貴	藤岡 慎介		○	藤岡 慎介	有川 安信	南條 創				
	11:40	山田 龍弥	藤岡 慎介		○	藤岡 慎介	有川 安信	川畑 貴裕				
昼休憩												
南條	13:00	YAN BING	石川 貴嗣			石川 貴嗣	青木 正治	青井 考		野海 博之	郡 英輝	(川畑研) 岡村
	13:20	宮原 里菜	小田原 厚子			小田原 厚子	川畑 貴裕	青井 考				
	13:40	古川 史也	大田 晋輔		○	青井 考	川畑 貴裕	大田 晋輔				
休憩												
石川	14:20	岩崎 遼大	民井 淳			民井 淳	大田 晋輔	上野 一樹				(民井研) 笹川
	14:40	佐野 弘明	細貝 知直			細貝 知直	川畑 貴裕	金 展		顧彦瑠		
	15:00	吉田 志音	吉田 賢市		○	保坂 淳	石井 理修	吉田 賢市		民井 淳	野海 博之	
16:00	判定会議：H701 (教授，准教授，及び審査委員の助教 全員出席)											

物性グループ (会場: D403)

2月12日 (水)

座長	開始時間	学生氏名	指導教員	ページ	進学	主査	副査	副査	副査	副査	タイムキーパー
新見	9:00	石田 一成	松野 丈夫			松野 丈夫	酒井 英明	塩貝 純一			(松野研)
	9:20	大森 晟矢	松野 丈夫			松野 丈夫	黒木 和彦	塩貝 純一			越智
	9:40	田島 悠輔	松野 丈夫			松野 丈夫	工藤 一貴	塩貝 純一			
	10:00	田中 天	松野 丈夫			松野 丈夫	花咲 徳亮	上田 浩平			
	10:20	森 祐輔	松野 丈夫			松野 丈夫	萩原 政幸	上田 浩平			
	休憩										
工藤	11:00	前田 涼太	花咲 徳亮			花咲 徳亮	萩原 政幸	村川 寛			(花咲研)
	11:20	見里 朝彦	花咲 徳亮			花咲 徳亮	吉野 元	酒井 英明			田中
	11:40	濱口 哲朗	豊田 岐聡			豊田 岐聡	松野 丈夫	大塚 洋一			
	休憩										
浅野	12:40	浦矢 郁人	工藤 一貴			工藤 一貴	新見 康洋	鳴海 康雄			(工藤研)
	13:00	岡 宏大	工藤 一貴			工藤 一貴	黒木 和彦	新見 康洋			上本
	13:20	菊池 遊	工藤 一貴	○		工藤 一貴	吉野 元	鳴海 康雄			
	13:40	眞崎 世聞	工藤 一貴			工藤 一貴	塩貝 純一	木田 孝則			
	14:00	韓 成徳	工藤 一貴			工藤 一貴	花咲 徳亮	松野 丈夫			
	休憩										
花咲	14:40	寒川 雄斗	新見 康洋	○		新見 康洋	工藤 一貴	近藤 浩太	蔣 男		(新見研)
	15:00	東原 有	新見 康洋	○		新見 康洋	松野 丈夫	蔣 男			山田
	15:20	松本 史弥	新見 康洋			新見 康洋	竹森 那由多	高田 真太郎			
	15:40	山口 優陽	新見 康洋	○		新見 康洋	萩原 政幸	高田 真太郎			
	休憩										
松野	16:20	井上 恭輔	浅野 建一	○		浅野 建一	黒木 和彦	竹森 那由多			(浅野研)
	16:40	西 裕介	浅野 建一			浅野 建一	越野 幹人	越智 正之			齊木
	17:00	松木 海登	浅野 建一			浅野 建一	黒木 和彦	越智 正之			
	休憩										
豊田	17:40	井上 祥	萩原 政幸			萩原 政幸	黒木 和彦	鳴海 康雄			(萩原研)
	18:00	山下 慧	萩原 政幸			萩原 政幸	花咲 徳亮	村川 寛	木田 孝則		坂本
	18:20	新正 朋暉	鳴海 康雄			鳴海 康雄	萩原 政幸	工藤 一貴			

物性グループ (会場: D403)

2月13日 (木)

座長	開始時間	学生氏名	指導教員	ページ	進学	主査	副査	副査	副査	副査	タイムキーパー
黒木	9:00	吉田 桃大	吉野 元		○	吉野 元	波多野 恭弘	(宇宙) 湯川 諭	(宇宙)		(松野研)
	9:20	小松 伴行	千徳 靖彦		○	千徳 靖彦	岩田 夏弥	吉野 元			田中
	9:40	奥田 直樹	千徳 靖彦		○	千徳 靖彦	岩田 夏弥	越野 幹人			
	10:00	柳川 颯斗	千徳 靖彦		○	千徳 靖彦	岩田 夏弥	浅野 建一			
		休憩									
吉野	10:40	西原 快人	木村 真一		○	木村 真一	豊田 岐聡	渡邊 浩			(豊田研)
	11:00	藤井 聡志	木村 真一			木村 真一	萩原 政幸	渡邊 浩			橘
	11:20	小西 優太	大岩 顕			大岩 顕	高田 真太郎	藤田 高史			
	11:40	千田 健一郎	大岩 顕	○		大岩 顕	新見 康洋	藤田 高史			
	12:00	ALIZADEH KASHTIBAN	EHS 大岩 顕			大岩 顕	越野 幹人	藤田 高史			
	休憩										
越野	13:00	植田 涼太	黒木 和彦		○	黒木 和彦	木村 真一	Keith Slevin			(黒木研)
	13:20	榎並 龍太郎	黒木 和彦			黒木 和彦	酒井 英明	越智 正之			工藤
	13:40	神山 周	黒木 和彦		○	黒木 和彦	工藤 一貴	越智 正之			
	14:00	高橋 佑瑚	黒木 和彦		○	黒木 和彦	浅野 建一	金子 竜也			
	休憩										
木村	14:40	河邊 潤	越野 幹人			越野 幹人	浅野 建一	越智 正之			(越野研)
	15:00	園 悠希	越野 幹人			越野 幹人	竹森 那由多	酒井 英明			吉田
	16:00										

判定会議: H701

(教授, 准教授, 及び審査委員の助教 全員出席)

宇宙地球科学専攻(会場：D303)

2月12日(水)

座長	開始時間	学生氏名	指導教員名	ページ	進学	主査	副査	副査	副査	タイムキーパー
桂木	9:20	木原 健司	長峯 健太郎	45	○	長峯 健太郎	井上 芳幸	住 貴宏		【長峯研】小林莉久
	9:40	坂井 延行	長峯 健太郎	45	○	長峯 健太郎	井上 芳幸	松本 浩典		
	10:00	水谷 耕介	長峯 健太郎	46	○	長峯 健太郎	高棹 真介	桂木 洋光	増田 賢人	
	休憩									
長峯	10:40	越智 友都	桂木 洋光	46	○	桂木 洋光	久富 修	波多野 恭弘		【桂木研】佐藤颯起
	11:00	國科 彩香里	桂木 洋光	47		桂木 洋光	山本 憲	波多野 恭弘		
	11:20	松本 波音季	桂木 洋光	47		桂木 洋光	久富 修	木村 淳		
	11:40	松本 和海	桂木 洋光	48		久富 修	桂木 洋光	湯川 諭		
	休憩									
波多野	13:00	布田 寛介	住 貴宏	48	○	住 貴宏	長峯 健太郎	増田 賢人		【住研】奥本祐生
	13:20	永井 堤	住 貴宏	49		住 貴宏	小高 裕和	鈴木 大介		
	13:40	濱崎 直人	住 貴宏	49		住 貴宏	井上 芳幸	鈴木 大介		
	14:00	浜田 隼陽	住 貴宏	50		住 貴宏	井上 芳幸	鈴木 大介		
	14:20	坂東 賢	住 貴宏	50		住 貴宏	増田 賢人	高棹 真介		
	休憩									
住	15:00	井上 駿	波多野 恭弘	51		湯川 諭	波多野 恭弘	吉野 元(物理)		【波多野研】加藤陸
	15:20	後藤 竜之介	波多野 恭弘	51		波多野 恭弘	田之上 智宏	桂木 洋光		
	15:40	服部 大貴	波多野 恭弘	52		波多野 恭弘	湯川 諭	高棹 真介		
	16:00	三上 周大	波多野 恭弘	52	○	波多野 恭弘	湯川 諭	吉野 元(物理)		
	16:20	宮原 健輔	波多野 恭弘	53	○	波多野 恭弘	湯川 諭	桂木 洋光		

宇宙地球科学専攻(会場：D303)

2月13日(木)

座長	開始時間	学生氏名	指導教員名	ページ	進学	主査	副査	副査	副査	タイムキーパー
横田	9:00	島 耕平	松本 浩典	55		松本 浩典	小高 裕和	横田 勝一郎		【松本研】河村穂登
	9:20	倉本 春希	松本 浩典	55	○	松本 浩典	小高 裕和	住 貴宏		
	9:40	白濱 健太郎	松本 浩典	56		小高 裕和	松本 浩典	上野 一樹(物理)		
	10:00	宮本 愛子	松本 浩典	56	○	松本 浩典	小高 裕和	長峯 健太郎		
	休憩									
松本	10:40	副島 美優	近藤 忠	57		西 真之	近藤 忠	大高 理		【近藤研】中村虎太郎
	11:00	高橋 虎太郎	近藤 忠	57		西 真之	近藤 忠	大高 理		
	11:20	宮川 恵輔	近藤 忠	58		近藤 忠	西 真之	佐野 孝好(レー研)		
	11:40	出口 大	佐々木 晶	58		大高 理	佐々木 晶	西 真之		
	12:00	中本 朝子	佐々木 晶	59		佐々木 晶	波多野 恭弘	木村 淳		
	休憩									
近藤	13:20	藤原 立貴	長峯 健太郎	59	○	長峯 健太郎	井上 芳幸	寺田 健太郎		【寺田研】武田晋弥
	13:40	佐藤 龍成	佐々木 晶	60		佐々木 晶	寺田 健太郎	木村 淳		
	14:00	江頭 勇介	佐々木 晶	60		佐々木 晶	寺田 健太郎	横田 勝一郎		
	14:20	北村 悠稀	寺田 健太郎	61		寺田 健太郎	横田 勝一郎	豊田 岐聡(物理)		
	14:40	炭谷 拓真	寺田 健太郎	61	○	寺田 健太郎	佐々木 晶	佐野 孝好(レー研)	福田 航平(物理)	
	16:00	判定会議:H701 (教授, 准教授, 及び審査委員の助教 全員出席)								

物理学専攻

素粒子・原子核グループ

会場：H701

2月12日（水）

COMET Phase-I 実験のためのスローコントロールシステムの開発

蔭山 裕士 青木研究室 (物理学専攻)

ミューオン電子転換過程を探索する COMET Phase-I 実験は、茨城県東海村の J-PARC で行われる。円筒形飛跡検出システム(CyDet)を用いて 105 MeV/c の信号電子運動量の測定を行う。CyDet を含む装置全体の安定動作の担保のために、磁場や温湿度、気圧、高電圧等の測定装置を包括的に監視・制御するスローコントロールシステムが必要である。

本研究ではスローコントロールシステムのために、検出器周りや実験環境全体の気圧や温湿度をモニタするための基板である『KAGE』の開発を行った。環境モニタリング用のセンサは検出器近傍に設置する予定であり、 $1 \times 10^{12} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ の中性子および 1 kGy のガンマ線に相当する高線量の放射線照射を受けることになるため、それらへの耐性が要求される。一方で、センサの制御用 PC は高放射線耐性をもたないため、検出器から 10 m 以上距離を離して設置する。したがって、センサと PC の間では長距離通信が必要となる。それを可能にするため、電流増幅器であるバッファの導入を検討した。バッファも高放射線領域に設置されるため、センサとバッファの両方に高放射線耐性が要求される。そこでセンサ候補とバッファ候補それぞれに対する放射線照射試験を行い、高放射線への十分な耐性をもつセンサとバッファを選定した。それらを組み込んだ『KAGE』を開発し、その性能評価を行い、温湿度の測定精度がそれぞれ $\pm 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $\pm 2 \%$ であることおよび検出器周りで安定動作することを確認した。

また、スローコントロールシステムは様々なパラメータを取得するため、それらの管理も包括的に行う必要がある。各データを整理して扱うために、得られるデータのフォーマットを統一してデータベース化し、統合管理することを予定している。その第 1 歩として、環境モニタリングシステム用のデータベースの開発を行った。開発したデータベースと『KAGE』を用いて動作確認を行い、正常にデータの書き込み・読み出しができることを確認した。

COMET Phase-I で用いるトリガー検出器の開発

佐々木 涼花 青木研究室 (物理学専攻)

COMET Phase-I は素粒子標準模型で強く抑制されているミューオン電子転換過程を探索する実験である。実験ではミューオンをアルミニウム標的に静止させ、原子核に捕獲されたミューオンが電子に転換する過程を探索する。この過程で生じる信号電子は 105 MeV/c の運動量を持つ。信号電子はアルミニウム標的周辺に設置する Cylindrical Detector System (CyDet) によって検出を行う。CyDet は Cylindrical Drift Chamber (CDC) と Cylindrical Trigger Hodoscope (CTH) から構成され、CTH はトリガー発行と時間測定を担う。CTH はプラスチックシンチレータのシンチレーション光を光学ファイバーで輸送し半導体光検出器 (SiPM) で電気信号に変換する。CTH には時間分解能とトリガーレート の 2 点において要求が課されている。本研究では CTH の性能評価を目的として CTH の実機と同じ配置を再現した試作機を初めて製作した。この試作機を用いてビーム試験を行い CTH が要求性能を満たすか評価した。その結果時間分解能は要求を満たしたが、光量は予測より小さかったため追加の調査を行った。また、CTH の副次的な役割として宇宙線ミューオン由来の背景事象の削減が期待されている。シンチレータ通過時に落とすエネルギーが電子とミューオンで異なることを利用し粒子識別の性能についても評価を行った。各粒子種の波高分布に閾値を設けることで 105 MeV/c のミューオンを 95%以上排除でき、背景事象の削減に貢献できることを示した。また、CTH が置かれる環境は中性子線量が大きくなることが予想されている。中性子損傷により SiPM の暗電流が増加し、時間分解能やエネルギー分解能が悪化するばかりでなく、不要なトリガー発行の要因にもなる。この対策として SiPM を冷却することにより高放射線環境下でも使用できる。CTH で使用する SiPM を目標である $-36 \text{ }^\circ\text{C}$ 付近まで冷却可能な冷却システムを設計・開発した。

COMET Phase-I にむけたトリガーシステム安定性評価

山田 千尋 青木研究室 (物理学専攻)

COMET Phase-I は、新物理に感度をもつ、原子核軌道上のミュオンが電子に転換する過程を探索する。COMET では高い統計量を得るために J-PARC の大強度陽子ビームを用いるが、それに伴い放射線量と背景事象の増加が課題となる。背景事象削減のため先行研究で開発されたトリガーシステムは、二つの主な検出器 Cylindrical Drift Chamber (CDC) と Cylindrical Trigger Hodoscope (CTH) それぞれで事象選別を行い、両者のコインシデンスをとる。各トリガーシステムの開発は概ね完了し、現在統合のための試験を進めている。統合にあたって重要なシステムの動作安定性には、システムを構成する基板間の通信安定性と放射線耐性が大きく寄与する。本研究では、約 100 枚の基板を用いた CDC トリガーシステム全数のセットアップを構築して通信安定性を評価した。この構築にあたり、ケーブルのアダプタ基板制作と、ケーブル選定を行い、全数接続して約 18 時間エラーなく通信できることを確認した。エラー 1 回発生につき 3 分デッドタイムが生じると仮定した時、得られたエラーレート上限値はデータ取得ライブタイム 99% 以上を保証する値であった。また、中性子照射試験によって中性子照射中のトリガーシステムの動作安定性を評価した。CDC 信号読み出し基板の FPGA に実装されたソフトウェア自己修復機能が正常に動作していることを確認し、トリガー基板との通信安定性に中性子による影響は見られなかった。さらに、熱中性子が引き起こすソフトウェアにも着目し、高速中性子ビームとポリエチレンブロックを用いた実験で調査した。その結果、CDC の信号読み出し基板の FPGA には熱中性子によるソフトウェアは発生しないことが判明した。

LHC-ATLAS 実験における SCT 検出器の位置分解能評価

泉尾 翼 南條研究室 (物理学専攻)

ATLAS 実験では、Large Hadron Collider の陽子-陽子衝突で発生する粒子を ATLAS 検出器で捉え、新粒子の探索やヒッグス粒子の精密測定を行っている。約 2T のソレノイド磁石の内側にある内部飛跡検出器で荷電粒子の通過位置を精密測定し、飛跡を再構成する。飛跡の曲率から荷電粒子の運動量を測る。飛跡検出器の一つである、半導体検出器 (SemiConductor Tracker, SCT) は、4 層のバレル部と、9 層のエンドキャップ部からなる。粒子がセンサーを通過した際に生じる信号を、 $80\ \mu\text{m}$ 間隔のストリップ電極から読み出し、粒子の通過位置情報を一次元で取得する。1 層あたり 2 枚のセンサーを 40mrad のステレオ角度をつけて貼り合わせることで、二次元の位置情報が得られる。運動量の測定精度に、SCT 検出器の位置分解能が寄与する。

ATLAS 実験は現在、ビームの重心系エネルギー 13.6TeV で Run3 (2022 年~2026 年) が稼働している。内部飛跡検出器はビームラインの近くに配置されており、高放射線下で運転している。2026 年の Run3 終了時点での放射線照射量は、Run1 から Run2 における照射量の 2 倍程度となる。放射線損傷により、位置分解能が悪化する恐れがある。Run3 以降では、SCT 検出器の位置分解能を系統的に調査した研究はされていない。そこで、本研究では Run3 環境下で運転し続けている SCT 検出器の位置分解能を調べた。位置分解能には、検出器に印加する高電圧や、検出器の位置など、様々な依存性があることが分かった。それらの依存性を取り除いたうえで、2022 年から 2024 年にかけての位置分解能の変化を調べた。

J-PARC KOTO II 実験のための UV 硬化アクリル樹脂を用いたシンチレータの開発

片山 舞 南條研究室 (物理学専攻)

J-PARC KOTO II 実験は、中性 K 中間子の稀な崩壊 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊を探索する次世代の実験である。この崩壊の素粒子物理学の標準模型での崩壊分岐比は、 3×10^{-11} と小さい。また、理論的不確かさも小さいため、新物理の手がかりを見つけやすい。KOTO II 実験では 2030 年代に $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の観測を目指す。

KOTO II 実験の信号事象は、 π^0 の崩壊による 2 光子のみである。そのため、検出器は光子を検出する電磁カロリメータと、他に検出できる粒子がないことを保証する veto 検出器からなる。検出器の大きさは全長 20 m、内径 3 m で、形は円筒状である。

本研究では、近年開発が進んできている UV 硬化アクリル樹脂を用いたシンチレータの発光機構を研究した。また、KOTO II 実験の多くの検出器では、プラスチックシンチレータを用いるため、コストを削減してシンチレータを作るためにも本研究を行なった。今回用いた UV 硬化アクリル樹脂は、紫外線を照射すると固まるアクリレート系のモノマーである。作成したシンチレータと市販品の光量を比較して、UV 硬化アクリル樹脂のシンチレータの発光機構を調べた。調べた項目は、適切な紫外線照射時間や蛍光剤の濃度と光量の関係、溶質に用いた蛍光剤と波長変換剤の混合比が光量に与える影響などである。なお、本研究で得られた最大獲得光量は、シンチレータ中での 1 MeV のエネルギー損失あたり 840 光電子であった。これはバイクロン社製のシンチレータ BC404 との相対比較で 0.49 倍である。

本発表では、発光機構を調べて得た知見について報告する。

MeV 質量のアクシオンに関する理論的研究

岩井喬也 素粒子理論研究室 (物理学専攻)

現代の素粒子物理学において、素粒子は標準模型によって記述され、様々な実験や観測事実と一致している。しかしながら標準模型では説明できない現象がいくつかあり、そのうちの一つに QCD の CP を破る源である θ 項が電弱理論の小林・益川位相 δ と比べ非常に小さいという、強い CP 問題がある。強い CP 問題を解決するメカニズムの PQ 対称性と呼ばれる $U(1)_{PQ}$ を導入するというものがあり、このメカニズムでは $U(1)_{PQ}$ が自発的に破れることで θ がアクシオンという場に置き換わり、力学的に θ 項が 0 になる。アクシオンのダイナミクスは PQ 対称性の破れのスケール f_a によって特徴づけられる。多くの研究では $f_a \gtrsim 10^9 \text{ GeV}$ ほどの大きな値のアクシオン模型が研究されている。しかし近年 $f_a \sim 1 \text{ GeV}$ でもアクシオン模型が実現できる可能性が指摘された。この模型では、アクシオンを第一世代のフェルミオンのみと結合させ、アップクォークとダウンクォークに特定の PQ 電荷を持たせることで既存の制限を満たしている。この模型では $f_a \sim 1 \text{ GeV}$ に取っているため GeV スケールで UV の理論が現れる。しかし UV の理論では複数のスカラー場が現れるため、この理論を真面目に解析することは難しい。しかしながら GeV スケールでアクシオン以外の粒子も現れるため、それらの粒子を解析することは重要である。そこで本研究では GeV スケールの模型の有効理論を議論し、その際現れるスカラー粒子に注目して解析を行った。特に中間子の崩壊を計算し既存の実験結果と比べることで、スカラー粒子の質量が軽い領域へ制限をつけた。

境界のある共形場理論のホログラフィック双対の解析

東家 聖 素粒子論研究室 (物理学専攻)

AdS/CFT 対応は量子重力の場の理論での定式化を与え、ホログラフィック原理を実現している。一方で、共形場理論(CFT)それ自体も臨界現象を記述する理論として重要であり、特に2次元の場合には理論に強い制限がかかり解析が容易になる。臨界現象という観点から言えば境界が存在する場合もあり、このときのCFTはBoundary CFT(BCFT)と呼ばれる。特に2次元のBCFTにおいては、CFTのcentral chargeに相当するboundary entropyや、c-theoremに対応するg-theoremといった特徴的な量や性質が現れることが知られている。

AdS/CFT 対応を拡張することにより、高柳はAdS/BCFT 対応を実現できることを示した[1]。その際にはAdSの境界にNeumann境界条件を課すことが本質的なアイデアになり、これにより古典的なAdSの境界を決定することが可能になる。実際にboundary entropyやg-theoremをホログラフィックに導くことができ、また、境界がある場合のHawking-Page phase transitionも見られる。本修士論文では主に、以上の具体的な方法について、[1]をレビューした。

[1] T. Takayanagi, "Holographic Dual of BCFT", Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 101602.

ドメインウォールフェルミオンと 対称性の破れを伴わない質量生成メカニズム

荒木 匠 素粒子理論研究室 (物理学専攻)

格子場の理論は場の理論を非摂動的に定式化できる強力な手法であるが、系がカイラル対称性をもつフェルミオンを含む場合にダブラー問題が発生し、特にカイラルなゲージ理論の定式化に未だ成功していないという問題を抱えている。この問題の解決策としてドメインウォールフェルミオンと対称性の破れを伴わない質量生成メカニズム(Symmetric Mass Generation)を組み合わせた手法が提案されている。カイラルな対称性をもつ系は対称性を破らずに質量をもつことが困難だが、近年ではアノマリーが存在しない場合に限り、そうした系に質量をもたせられる可能性があることがわかってきた。このメカニズムを用いて不要なダブラーが除去できる可能性が示唆されている。ドメインウォールフェルミオンの手法を用いて5次元空間上でダブラーと物理的粒子を分離し、ダブラーに質量を与えてDecoupleさせることでカイラルな対称性を保ったまま格子上にフェルミオンが実現できると期待できる。

こうしたアプローチが可能か判断するために、ドメインウォールフェルミオンとSymmetric Mass Generationの機構、質量生成が実際に確認されているモデルについてのレビューを行う。

物理学専攻
素粒子・原子核グループ
会場：H701
2月13日（木）

内側電磁石回転型重粒子線治療用ガントリー概念設計

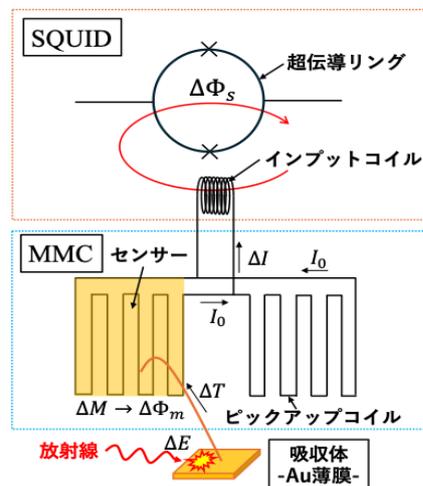
渡辺 薫 RCNP 加速器研究部門

重粒子線治療は、炭素線を用いて体内のがん細胞を死滅させる非常に効果的ながん治療法の一種で、重粒子線のブラッグピークを腫瘍患部位置に合わせることで治療を行う。重粒子線は、X線や陽子線に比べて線量集中性が高く生物学的な効果が高い。粒子線治療では、粒子が通過する領域にある健康な細胞へのダメージを最小限にするために、複数の異なる角度からの照射で治療が行われる。そこで、照射方向の変更のために、回転型ガントリーが用いられてきた。しかし、重粒子線の場合、磁気剛性が最大6.6Tmにも及ぶため回転型ガントリーの大型化が避けられなかった。今回の概念設計では、粒子の偏向面内の方位角方向に複数の小型超伝導電磁石を配置し、粒子軌道に沿った磁場分布を調整することで、ガントリー自体を回転させることなく、内側電磁石のみを回転させることでビームを最適な治療角度に誘導する照射システム的设计を行った。これにより、従来の重粒子線用回転ガントリーよりもコンパクトで制御性に優れた照射システムによる高効率な治療が期待される。今回は、この内側電磁石回転型ガントリーの機器構成や磁場分布解析、及びビーム輸送解析などについて発表する。

CaF₂ 蛍光熱量計による0νββ探索に向けたMMC センサーの性能評価

西川 隆博 川畑研究室 (物理学専攻)

宇宙・素粒子物理学上の問題を解明する研究としてニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊(0νββ)探索実験がある。0νββは非常に稀な現象であり、背景事象低減のために高エネルギー分解能を持った検出器が必要である。本研究では⁴⁸Caを含むCaF₂結晶を用いた蛍光熱量検出器の開発を行った。放射線を吸収した際の温度上昇を読み取るセンサーとして金属磁気熱量計(MMC)を使用した。MMCは100mK以下で動作し、温度上昇を磁化変化に変換するセンサーである。MMCで起こった変化を超伝導干渉素子(SQUID)で読み出す。CaF₂結晶を用いた蛍光熱量検出器開発の前段階として、CaF₂結晶で発生する温度上昇を電気信号に変換するMMC-SQUIDセンサーの読み出し試験を実施して性能評価を行った。Au薄膜を放射線の吸収体とし、²⁴¹Am線源のα線(E=5.4MeV)を吸収した際の温度変化をMMC-SQUIDで読み出す測定セットアップを作成した。断熱消磁冷凍機(ADR)によって50mKまで冷却・測定した。測定された信号の解析から得られた試験セットアップのエネルギー分解能は、予想よりも大きいものであったため、ノイズ分析を行い分解能を最適化した。この測定結果を踏まえて、ADRよりさらに低温を実現できる希釈冷凍機を使って同様のセットアップの測定を行った。センサーの性能評価、希釈冷凍機での測定中に発生した問題、今後のCaF₂結晶蛍光熱量計による測定に向けての課題について発表する。



図：MMC-SQUIDのイメージ図

ミュオンスピンイメージング法の開発

石谷 壮史 川畑研究室 (物理学専攻)

μ SR (Muon Spin Rotation/Relaxation/Resonance) 法とは、スピン偏極ミュオンビームを用いる分光法である。ミュオンのスピン軸に対し非対称に放出される陽電子の検出を利用して、ミュオンスピンの運動を観測する手法であり、物質内部の磁場を探索するための物性手法の一つとして広く利用されている。しかし、従来の μ SR 法ではミュオンと陽電子の時間しか測定しないため、試料位置の情報は得られない。

そこで、我々はミュオンと陽電子の位置を同時に測定する、ミュオンスピンイメージング法という新たな手法の開発を行なった。ミュオンと陽電子の飛跡をトラッキングすることで、試料中のミュオンの停止位置を決定することができる。これにより試料の微小領域における μ SR 測定、さらには、試料位置ごとの μ SR スペクトルの解析を行うことにより、様々な μ SR パラメータを用いた 3 次元イメージングが可能となる。

本研究では、エネルギーの揃った表面ミュオンビームを用いて、既知の物質を組み合わせた試料において表面の 2 次元イメージングを行い、その解像度の評価を行なった。実験は、2024 年 9 月にカナダの TRIUMF 研究所にて行い、ミュオンと陽電子の位置測定にはそれぞれドリフトチェンバーとプラスチックシンチレーションファイバーを用いた。

結果として、Al と Al₂O₃ の混合試料について、プラスチックシンチレーションファイバーにより 1.5×1.5mm² 程度の解像度で試料の形状を再現することができた (図 1)。

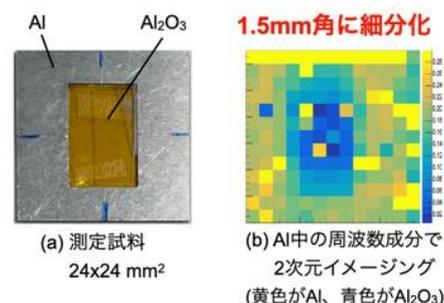


図 1. 混合試料表面の 2 次元
ミュオンスピンイメージング結果

¹²C(n,n')断面積測定に向けた MAIKo+ TPC の開発

LIN YIFAN 川畑研究室 (物理学専攻)

トリプルアルファ反応は宇宙の元素合成において重要である。その反応率を決めるには、¹²C の 3 α 共鳴状態から基底状態に脱励起する確率を決定する必要がある。特に、超新星爆発などの高温高密度の環境では、3 α 共鳴状態の ¹²C が電磁崩壊して脱励起する過程だけでなく、背景粒子の中性子との非弾性散乱によって脱励起する反応も考慮する必要がある。しかし、この反応の断面積を直接測定することは 3 α 共鳴状態の寿命が非常に短いために不可能である。そこで、我々は中性子との非弾性散乱により ¹²C の基底状態が 3 α 共鳴状態へ励起する反応の断面積を測定し、詳細釣り合いの原理から脱励起する反応の断面積を算出する実験を計画している。

我々は MAIKo+ アクティブ標的を用いて 3 α 共鳴状態から放出された 3 つの α 粒子の飛跡の長さ・角度を測定し、不変質量法から ¹²C の励起エネルギーを決定する。しかし、2022 年に OKTAVIAN で行ったテスト実験では、電子増幅率が足りず、信号が閾値を超えず検出されなくなったイベントと、トリガー信号の発生が遅れて ¹²C の励起エネルギーを正確に再構築できないイベントの存在を確認した。物理測定に向けて、我々は電子増幅用の GEM を 1 枚増設し、電子増幅率が十分になったことを確認した。

また、これまでのテスト実験のデータ解析では、バックグラウンドイベントの排除及び 3 つの α 粒子の飛跡の始点・終点の決定を人間の目で Eye Scan していた。しかし、物理測定で取得見込みのデータの数が膨大であり、人間による Eye Scan では取得データの全てを解析することは難しいため、我々は Deep Learning モデルに基づいた自動解析アルゴリズムを開発し、2022 年に OKTAVIAN で行った MAIKo+ のテスト実験のデータで自動解析アルゴリズムの効果を評価した。

AT-TPC を用いた ^{24}Mg における α 凝縮状態の 探索実験のためのシミュレーション

坂上 宗樹 原子核実験研究室 (物理学専攻)

軽い原子核の励起状態には、複数の核子が強く相関したクラスター構造が発現することが知られている。様々なクラスターの中でも、2 個ずつの陽子と中性子からなる α クラスターは最も重要なクラスターである。陽子数と中性子数が等しく質量数が 4 の倍数である原子核、いわゆる $4n$ 核では、 n 個の α クラスターが最低エネルギー軌道に凝縮し、 α 凝縮状態が現れる可能性が指摘されている。 α 凝縮状態は、通常の原子核に比べて密度が約 1/6 という低密度な状態であると考えられており、低密度な原子核の物性を知る上で興味深い。 α 凝縮状態は $A \leq 40$ の $4n$ 核において存在することが示唆されている。しかし、現在、 $A \geq 16$ の原子核において α 凝縮状態の存在は確立されていない。そこで我々は、全立体角に渡って低エネルギーの荷電粒子の飛跡を 3 次元的に決定できる大型ガスアクティブ標的 AT-TPC 検出器を用いて $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 散乱を測定することで、 ^{24}Mg における 6α 凝縮状態を探索することを着想した。 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 散乱によって 6α 凝縮状態が生成されると、より軽い原子核における α 凝縮状態を経由して 6 つの α 粒子に崩壊すると期待される。そこで、この実験では、約 0.1 atm のイソブタンガスで満たした AT-TPC に 50 MeV の ^{12}C ビームを入射させる。入射した ^{12}C ビームは AT-TPC の内部でエネルギーを損失しながら進んだのち、イソブタン中の ^{12}C と反応するため、反応位置を測定すれば反応エネルギーを決定できる。この手法を用いることで、 $E_{\text{c.m.}} = 17.5\text{--}22.5$ MeV における $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 散乱を一度に測定することが可能になる。

本研究ではこの測定を実現するために、実験条件の最適化を行った。具体的にはバックグラウンドとなる $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C} + \text{p}$ の弾性散乱によるイベント数の評価、 6α 凝縮状態の崩壊による全粒子の検出効率の評価、各々の反応による検出パターンから測定におけるトリガー条件の検討、測定におけるガス圧の最適化を行った。

液体重水素ターゲットを用いた高速点火レーザー核融合に関する研究

唐木 優河 藤岡研究室 (物理学専攻)

レーザー核融合の高速点火方式では、高密度に圧縮された核融合燃料に短パルス高強度レーザーを照射し、瞬時に加熱を行う。この方式では、従来用いられてきた中空構造の燃料を使用する必要がなく、流体力学的に安定した中実燃料を利用できるという利点がある。本研究の目的は、液体重水素を充填した中実燃料球を開発し、高速点火レーザー核融合実験を実施することである。核融合反応率を含む複数の物理量を統合的に計測し、高速点火方式によるレーザー核融合点火に至る物理過程を明らかにできる。本研究は、大きく二つの課題に取り組んだ成果から成り立っている。第一に、重水素冷却装置および重水素充填用ターゲットの設計と製作を行った。完成した冷却装置は、液化に必要な約 20 K までの冷却性能を有することが試験によって確認された。ターゲットの設計では、冷却しながら重水素を安定して供給する構造を確立し、その実現性が確認された。第二に、短パルス高強度レーザーを用いてプラズマ加熱効率の向上を目指した実験を実施した。プラズマ加熱には、レーザーのメインパルスとバックグラウンド成分の強度比（コントラスト）を高めることが重要である。本研究では、高コントラストレーザーとコーン構造の相乗効果が加熱効率の大幅な向上に寄与することを示し、その結果として、チタンをドーピングしたプラスチック薄膜を 7 keV の電子温度にまで加熱することに成功した。さらに、加熱効率を一層向上させるための新たな試みとして、複数の放物面を組み合わせ合わせた複合放物面型集光器（CPC）を導入した。CPC の使用により、装置を装着しない場合と比較してプラズマ加熱が進むことが確認されたものの、従来使用されてきたコーン構造との比較では、顕著な加熱効率の差は見られなかった。これらの成果により、高速点火方式のレーザー核融合研究におけるプラズマ加熱プロセスの理解が深まり、将来的な実験の最適化に向けた貴重な知見を得ることができた。

放射化計測および機械学習による核融合プラズマ診断

松原 広貴 藤岡研究室 (物理学専攻)

2022年12月、国立点火施設がレーザー核融合による点火に成功し、レーザー核融合はカーボンニュートラル実現に向けた新たなエネルギー源として注目を集めている。現在、核融合研究の主流であるD-T反応は反応断面積が大きく、実現が容易である一方、高エネルギー中性子による炉壁の放射化や放射線防護が課題となっている。これに対し、p-B反応は反応の実現が難しいものの、中性子の発生割合が1%未満と低く、燃料が安定同位体で自然界に豊富に存在する点で注目されている。本研究では、主反応 $^{11}\text{B}(p, 2\alpha)^4\text{He}$ とは別の副反応 $^{10}\text{B}(p, \alpha)^7\text{Be}$ 、 $^{11}\text{B}(p, n)^{11}\text{C}$ で生成される放射性同位体 ^7Be 、 ^{11}C の収量を放射化計測により測定し、主反応数を定量的に評価することを目的とした。従来、主反応数の決定には α 粒子計測が用いられてきたが、 α 粒子の検出が難しい点や、他の反応による α 粒子の影響で反応数が過大評価される等の課題があった。放射化計測はこれらの課題を回避できる新たな計測手法である。

実験では、BoronとHydrogenで構成された平板ターゲットにIn-target法およびPitcher-catcher法の二通りの方式で加速したprotonを照射した。レーザーのショット後、生成された放射性同位体を回収し、ゲルマニウム半導体検出器で計測を行った。その結果、 ^7Be (半減期: 53.22日)と ^{11}C (半減期: 20.36分)の生成を確認し、これらの信号からショット直後での収量を算出した。主反応 $^{11}\text{B}(p, 2\alpha)^4\text{He}$ は反応断面積と放射化計測により決定されたprotonのエネルギー分布を用いて計算された。protonのエネルギー分布は1次元のBoltzmann分布を仮定し、その勾配温度と強度を ^7Be および ^{11}C の収量から決定した。この解析の結果、In-target法によるp-B反応数が先行研究と比較して、最大であることが確認された。

レーザー駆動によるスピン偏極熱中性子の発生に関する研究

山田 龍弥 高強度レーザー実験グループ (物理学専攻)

中性子は様々な分野での応用が期待されている。中でも「スピン偏極中性子散乱法」は磁気物性材料研究において不可欠であり、原子核レベルでの磁気構造を知る唯一の方法である。従来100%スピン偏極熱中性子の生成は困難であった。シュテルンゲルラッハ実験で知られる磁場を用いて中性子のスピンを分離する手法は、理論上100%のスピン偏極熱中性子の生成が可能である。本研究ではレーザー駆動中性子源とハイパワーレーザーによる超高強度磁場を用いて、100%スピン偏極熱中性子の分離実験を行った。重水素の光核分解反応 $\gamma(d, p)n$ を用いて、 γ 線のエネルギーを重水素の光核分解反応閾値近傍にすると、中性子のエネルギーを0近くにすることができる。この手法によりモデレーターを用いずに熱中性子の直接発生が可能である。本研究ではLFEXレーザーにより、短パルス点光源の中性子を発生させ、激光XII号レーザーで生成した磁場によりスピン偏極中性子を発生させる実験を行った。LFEXレーザーで発生させた中性子源は高速中性子から熱中性子までを含む連続エネルギースペクトルである。その中から、熱中性子が磁場発生ターゲットを通過する時刻に合わせて激光XII号を照射してパルス磁場を発生させた。本研究におけるLFEXレーザー駆動の中性子発生実験では、中性子以外にも陽子等、放射線バックグラウンドノイズが非常に大きく、意図したスピン偏極熱中性子のみを計測できる計測器を開発することが重要であった。

中性子パターンは、磁場により中性子スピン(上・下)に応じて左右に分かれることが予測されており、分離された中性子はすなわちスピン偏極中性子となっている。計測結果より、磁場計測信号以外の信号を含んでいることから、バックグラウンド中性子による信号を含んでいることから、バックグラウンドの分離解析を行なっている。本研究によりレーザー駆動方式によるスピン偏極中性子発生のために行った。

LEPS2 ソレノイド実験における中性子検出器の性能評価

巖 氷 核物理研究センター (物理学専攻)

バリオンや中間子が発見されて以来、200種類以上のハドロンが発見され、それらの特性をうまく説明する構成子クォーク模型が構築された。しかし、この模型は基底状態のハドロンの性質をうまく説明することに成功したが、構成子クォーク模型では説明できないハドロンの励起状態が発見された。そういったエキゾチックなハドロンの理解のために、ハドロンの励起状態の探索実験は重要である。LEPS2 ソレノイド実験は、SPRING-8 のビームラインを利用し、高輝度・高エネルギーの γ 線を用いて、核子共鳴やペンタクォーク粒子の探索実験を行っている。核子共鳴の研究では、核子を標的とした中間子の光生成反応を利用して様々な核子励起状態を生成する事で、その性質を研究している。現在、中間子の光生成反応に関するデータの大半は陽子標的のデータであり、中性子標的のデータは少なく重要である。中性子標的を用いた反応では、多くの場合、中性子が放出されるため、中性子検出器が重要となる。中性子放出に伴う反応に対して、中性子検出器の性能が実験の精度やデータの信頼性を左右するため、性能評価が重要である。

本研究では、2022 年後半に実施した LEPS2 ソレノイド実験で収集したデータを解析して、中性子検出器の性能を評価した。Slew 補正をして、補正パラメータを求め、中性子検出器の減衰長とシンチレーション光の伝搬速度を求めた。ビームの近くに配置した横幅が狭い検出器の方長い減衰長を持つことがわかった。全イベントの TOF (Time Of Flight) と、前方の SC にヒットが無い条件で選んだ中性イベントの TOF を求めて比較した結果、中性イベントの TOF の方が精度が高い。また、中性粒子イベントの TOF を用いて、中性子のエネルギー分布を求めた。時間分解能の y 座標 (中性子検出器の縦軸) 依存性を調べた結果、検出器の中心付近の時間分解能がよく、以前のテスト実験の結果と同じ傾向が見られた。

スピン偏極した ^{33}Mg の β 遅発中性子崩壊による ^{33}Al の中性子非束縛状態の研究

宮原 里菜 原子核実験 (川畑) 研究室 (物理学専攻)

原子核は陽子と中性子で構成されており、その数が魔法数になると周辺核と比較してより安定で球形になることが知られている。しかし、中性子数が魔法数 20 の中性子過剰核領域 (逆転の島) においてその性質が消失し、また 1 つの核内で様々な構造 (変形・運動) が出現することが実験的に明らかになった。本研究ではこの逆転の島と呼ばれる領域の陽子側の境界に位置し、中性子数が魔法数 20 である ^{33}Al 核の構造の解明を目指し、スピン偏極した ^{33}Mg 核の β 崩壊実験を行った。中性子過剰核である ^{33}Al 核は中性子分離エネルギーが小さく、 β 崩壊の反応の Q 値が大きいため、構造解明には中性子非束縛状態の情報が重要である。そのため今回は ^{33}Al 核の中性子非束縛状態に注目して β 遅発中性子を詳細に調べた。中性子のエネルギーを精度良く決定するために Time of Flight (TOF) 法を用いた。また、各エネルギー準位のスピン・パリティを決定するために、スピン偏極核から放出される β 線の放出角度分布の非対称性を利用した。

実験はカナダの TRIUMF にて行い、 γ 線を Ge 検出器で、 β 線と中性子をプラスチックシンチレータで測定し、 γ 線、 β 線および中性子の同時計測データの収集、解析を行った。

その結果、 β 崩壊後に放出される中性子を 14 個発見した。発見した中性子のエネルギーから提案できる中性子非束縛状態のうち、4 つの状態のスピン・パリティを確定することができ、2 つの状態のスピン・パリティは選択肢を 2 つまで絞ることができた。この 6 つの中性子非束縛状態について β 崩壊強度や $\log ft$ 値を導出して ^{33}Mg 核から ^{33}Al 核の中性子非束縛状態への β 遅発中性子崩壊様式を構築した。この実験結果を原子核殻模型計算コード "KSHELL" による理論計算と比較し、その状態の構造を議論した。

連続読み出しデータ収集システムを用いた 核子対移行反応測定に向けたオンラインフィルター開発

古川 史也 素粒子核反応グループ

本研究の目的は、核子多体系における対相関および対凝縮相の解明を目指した陽子・中性子対移行反応測定に必要な稀少事象を効率的に選別するオンラインフィルターの設計と性能評価である。核子対相関および対凝縮相は、原子核の構造や性質のみならず中性子星内部構造の理解において重要な研究課題であり、質量測定や対移行反応測定によってペアギャップや対分極率を指標とする定量化が進められている。本研究では高分解能磁気スペクトロメータ **Grand Raiden** を用い、スズの安定同位体を標的とした陽子・中性子対移行反応 (${}^4\text{He}, {}^6\text{Li}$) の系統的な測定を目指している。着目する反応は0.1%程度の稀少事象であり、測定中には全体で毎秒20万以上の事象が発生する。一方、従来のトリガー型DAQシステムでは毎秒1万事象が処理上限であり、ハードウェアによるトリガー生成が困難であるため測定が難しい。

そこで我々はトリガーレス型連続読み出しDAQシステムを導入し、全イベントデータをデジタル化した後にソフトウェアで事象を選別する方式を採用し測定を実現した。一方この方式では膨大なデータ量が発生するため、有意な事象を迅速に抽出するオンラインフィルターが必要である。本研究では粒子弁別や飛跡再構成のアルゴリズムの一部をオンラインフィルターとして実装することで、信号ノイズ比の向上とデータ量の削減を目指した。本講演ではこれらフィルターの設計および性能評価結果を示す。

レーザープラズマから放出される γ 線のエマルジョンによる測定と エマルジョンの性能評価

岩崎 遼大 民井研究室 (物理学専攻)

レーザーの技術の進歩により、到達可能な集光強度は年々増加している。これに伴い、レーザープラズマから放出される電子のエネルギーも数十MeVまで達するようになってきている。このような状況下で、高強度パルスレーザーと標的との相互作用で原子核反応が発生する可能性が示唆されている。この原子核反応の発生の可能性を解明するためには、レーザープラズマからの γ 線を測定し、レーザープラズマ内での放射線発生メカニズムを明らかにすることが重要である。従来のシンチレーターなどの検出器では検出器信号のパイルアップにより、個別の放射線のエネルギーに関する情報を得ることは困難であった。そこで γ 線を測定するにあたって、新しく原子核乾板(エマルジョン)を検出器として導入する。エマルジョンは古くから素粒子実験で使用されてきた検出器で、写真フィルム的一种である。特徴として非常に高い空間分解能を有しており、1イベントの中で多くの荷電粒子が存在する状況下でもその高い分解能から識別することが可能である。この特徴を活かすことにより、レーザープラズマから放出される大量の荷電粒子などの生成粒子の中から、 γ 線対生成由来の電子陽電子を識別することで γ 線のみをキャプチャーする。

本研究では高強度パルスレーザーを標的に照射し、その標的からの放射線をエマルジョンで測定することによって、標的内で起きている原子核反応を探り、その機構を解明する前段階を目指す。レーザープラズマから放出される γ 線を測定した事例はこれまでになく、レーザー起因の γ 線を測定することを目標とした。さらにエマルジョンの低エネルギー領域($\sim 50\text{MeV}$)における性能評価を行い、レーザープラズマから放出される電子線の低エネルギー領域での検出効率を測定する。

本論文ではレーザープラズマからの γ 線の測定とエマルジョンの性能評価について述べる。

レーザー航跡場加速の衝撃波入射過程における密度プロファイルの影響に関するシミュレーション

佐野 弘明 細貝研究室 (物理学専攻)

超小型 X 線自由電子レーザーの実現に向けた研究が進展する中、そのインジェクターとしてレーザー航跡場加速 (LWFA) を用いる加速システムが注目されている。この技術は、従来型加速器と比較して非常に高い加速勾配を実現するという優位性を有する一方で、レーザープラズマ不安定性に起因する電子ビームの品質劣化が深刻な問題となっている。特に、アンジュレーターへの入射条件として求められる電子ビームの単色性の悪化が重要な課題である。この問題に対処するため、我々は衝撃入射法を採用している。衝撃入射法は、超音速ガスノズルを通じて高圧ガスを放出し、ナイフエッジによるガス圧縮過程で形成される局所的減少 (ダウンランプ) 構造を利用するものである。この方法では、背景プラズマ電子を瞬間的に加速位相へ入射させることで、単色性の高い電子ビームを生成することが可能である。

本研究では、PIC シミュレーションを用いて、ガス圧縮過程で生じる標的密度分布、特にショック面の背後に形成されるダウンランプ構造および局所的増加 (アップランプ) 構造に着目し、更にガス圧力変化による密度変動が単色性に与える効果を調べた。

まずダウンランプ長を制御することで航跡場の位相速度の減少割合が変化し、加速位相に入射される電子量の変化を通して単色性を改善できることが示された。更に、アップランプ領域では航跡場の位相速度が光速以上にまで上昇し、電子バンチ中の低運動量電子を選択的に排除することで、ビームローディング効果を抑制しながら単色性を向上できることが明らかとなった。また、ガス圧力の影響を考慮した計算では、ガス圧力の増加による、背景電子密度の上昇に伴う航跡場の強化により、電子バンチの電荷量とエネルギーの双方を増加させることで単色性を維持することが可能であることが確認された。

相対論的平均場理論に基づくアクチノイド及び超重核領域における核分裂機構の研究

吉川 志音 関西大学理工学研究科量子多体物理研究室

アクチノイド領域と超重核領域の原子核は自発的核分裂が生じやすいことで知られている。これまでの理論的研究の多くは非相対論的枠組みで行われており、異なる枠組みからの研究は有用である。本研究では原子核を核子と中間子で構成された量子多体系として扱うことで相対論的枠組みによって記述し、原子核の基底状態と変形度に拘束条件を設けた拘束条件付き計算によって、アクチノイド領域の ^{240}Pu と殻模型において球形核が基底状態となることが予想されている超重核領域の ^{298}Fl の核分裂機構について解析した。本研究では原子核を核子と σ, ω, ρ 中間子及び光子で構成される量子多体系とする相対論的平均場(RMF)理論を採用した。原子核には時間反転対称性、荷電対称性、そして軸対称変形することを仮定する。このとき、系の Lagrange 密度に対して最小作用の原理を適用することで、核子に対する Dirac 方程式、各中間子に対する Klein-Gordon(KG)方程式を得ることができる。RMF 理論では、これらの Dirac 方程式と KG 方程式を自己無撞着に解く。また、原子核の対相関は BCS 近似を用いて導入した。

本研究では球形核の結合エネルギー等の実験値に fitting した NL1 パラメータ、そして中性子過剰核の中性子半径等の実験値に fitting した NL3 パラメータを用いて計算をし、共同研究者による非相対論的 Hartree-Fock(HF)法による計算結果との比較も行なった。アクチノイド領域の ^{240}Pu ではグラフの概形にいずれも違いはほとんど現れなかった。一方、超重核領域の ^{298}Fl では HF と NL1 パラメータの結果はグラフの概形に違いはほとんどなかったが、NL3 パラメータは第 1 障壁の高さが HF・NL1 に比べて低く出る結果となった。

物理学専攻
物性グループ

会場：D403

2月12日（水）

ペロブスカイト Fe 酸化物薄膜における交替磁性の探究

石田 一成 松野研究室 (物理学専攻)

近年、強磁性体と反強磁性体に次ぐ第三の磁性体と言われる交替磁性体 (altermagnet) の存在が理論的に提唱され、実験的な検証が進められている。交替磁性体は反強磁性体と同様に全体として磁化を持たないが、特殊な結晶構造対称性により強磁性体と同様に時間反転対称性を破る。このため、スピン流生成や異常ホール効果 [1] といった特異な物性を示すことが予測されている。これらの現象を活用することで、交替磁性体は次世代スピントロニクスデバイスへの応用が期待されている。

本研究では、 $GdFeO_3$ 型歪みを持つ直方晶ペロブスカイト構造に属し、反強磁性的スピン配列 ($G_x A_y F_z$) を持つ $3d$ 遷移金属酸化物 $LaFeO_3$ [2] に着目し、その交替磁性体としての性質を実験的に観測することを目的とした。 $LaFeO_3$ は結晶の glide 対称性に起因する交替磁性体であることが予測されており、異常ホール効果では、通常の弱強磁性による寄与に加えて、共線的な反強磁性成分による寄与が期待される [1]。そこで、面直方向に弱強磁性成分 F_z を、面内方向に共線的な反強磁性成分 G_x をそれぞれ配向させるために、直方晶ペロブスカイトである $NdGaO_3(110)$ 基板を用い、パルスレーザー堆積法によって $LaFeO_3$ エピタキシャル薄膜を作製した。有限周波数 ($\omega \neq 0$) での異常ホール効果に対応する磁気光学 Kerr 効果を測定した結果、 $LaFeO_3$ の吸収端近傍である $h\omega = 2.9$ eV において Kerr 回転角のピークを観測し、磁場に対して $\mu_0 H = 1.3$ kOe で符号が反転する明瞭なヒステリシスを明らかにした。さらに、薄膜のドメイン構造、磁化、光学伝導度スペクトルを合わせて検討することで $LaFeO_3$ の交替磁性体としての可能性を議論する。

[1] M. Naka, Y. Motome, and H. Seo, Phys. Rev. B **103**, 125114 (2021); *ibid.* **106**, 195149 (2022).

[2] E. Bousquet and A. Cano, J. Phys.: Condens. Matter **28**, 123001 (2016).

LaNiO₃-SrTiO₃ 超格子における層数制御を通じたバンド幅変調

大森 晟矢 松野研究室 (物理学専攻)

ペロブスカイト型ニッケル酸化物 $RNiO_3$ (R : 希土類元素) は、 R のイオン半径を減少させることで、強相関金属である $LaNiO_3$ (LNO) からバンド幅制御によるモット転移を示す典型的な強相関電子系として広く研究されてきた。近年、類似の結晶構造を持つ層状ニッケル酸化物 $La_3Ni_2O_7$ において最初にバルクで [1]、続いて薄膜で [2] 超伝導の発現が報告され、その機構解明への期待が高まっている。特に、3次元構造を持つ LNO を母物質にとらえ、その構造を二次元化した際にどのような現象が生じるのかを明らかにすることは、超伝導機構解明において重要な示唆を与えることが期待される。

本研究では、LNO とバンド絶縁体 $SrTiO_3$ (STO) との人工超格子を作製することで、次元性制御を通じた強相関金属からの電子相制御を目的とした。まず、LSAT(001)基板を用いて LNO 単膜の製膜条件を最適化し、全温度領域で金属的振る舞いを示すエピタキシャル薄膜の合成に成功した。次に、LNO 層数 $\sim 2-5$ 、STO 層数 ~ 2 、超格子の繰り返し回数を 10 に固定して LNO-STO 超格子の作製条件を最適化した。X 線回折における超格子ピークの強度を指標に成膜条件を最適化するとともに LNO 層数と STO 層数を評価した。得られた超格子に対して電気抵抗率を測定した結果、LNO 層数が 3 を下回ると低温領域において抵抗率の増加が確認された。これは、LNO 層が薄くなることで二次元性が增强され、バンド幅の減少によりモット絶縁相への転移が生じているためと考えられる。講演では、ホール係数や界面伝導の影響についても併せて議論する。

[1] H. Sun *et al.*, Nature **621**, 493 (2023).

[2] E. K. Ko *et al.*, Nature (2024). DOI: 10.1038/s41586-024-08525-3

CrSe₂ 三角格子反強磁性ネットワークを有する Cr セレン化物のエピタキシャル薄膜合成と磁気伝導特性

田島 悠輔 松野研究室 (物理学専攻)

CrSe₆の八面体が稜共有で2次元的につながったCrSe₂ネットワークは、最近接のCrスピンの反強磁性的に結合された三角格子である。幾何学的フラストレーションの効果によるエキゾチックなスピン構造と、それに由来する新奇な磁気伝導現象の発現が期待される。本研究では、CrSe₂ネットワークを有するCrセレン化物の中から、最も単純な結晶構造をもつNiAs型CrSeと、CrSe₂層間にAgイオンがインターカレートされたAgCrSe₂に着目し、パルスレーザー堆積法による薄膜合成と物性評価に取り組んだ。CrSeは非共面的なスピン構造[1]をもつ半金属であり、AgCrSe₂はラシュバ型の強いスピン軌道相互作用を示すp型の極性半導体である[2]。薄膜化によりこれらの特長を活かした新奇輸送現象の観測が期待されるが、いずれの物質においても、単相薄膜における物性評価の報告例は限定的であった。まず始めに行ったCrSeの薄膜研究では、Cr/Se組成比を最適化したCrSe薄膜において良好な金属伝導を観測し、磁気伝導測定から非共面的なスピン構造を薄膜で初めて明らかにした[3]。次に、CrSe₂ネットワーク物質の薄膜高品質化に有効な単結晶基板を検討した。六方晶系の薄膜成長によく使われるAl₂O₃(001)基板を用いたCrSe薄膜成長では、複数の面内回転ドメインが形成されることが明らかになった。これに対し、格子整合の良いYSZ(111)基板を用いると、単一ドメインのCrSe薄膜が得られた[4]。本知見を活かして、YSZ(111)基板上でAgCrSe₂薄膜合成を行った結果、単相AgCrSe₂の薄膜合成に初めて成功し、バルク既報値と同程度の磁気転移温度とバンドギャップが得られた。本発表では、AgCrSe₂薄膜素子における電気抵抗測定及び磁気抵抗測定の結果についても報告する。 [1] L. M. Corliss *et al.*, Phys. Rev. **122**, 1402 (1961). [2] G. Siemann *et al.*, npj Quantum Mater. **8**, 61 (2023). [3] Y. Tajima *et al.*, APL Mater. **12**, 041112 (2024). [4] Y. Tajima *et al.*, in preparation.

ペロブスカイト型マンガン酸化物を用いた一方向性スピンホール磁気抵抗効果

田中 天 松野研究室 (物理学専攻)

近年、電子のスピン角運動量の流れであるスピン流を積極的に活用したスピントロニクスにおいて、様々な磁気輸送現象が注目を集めている。特に、電流-スピン流変換を担う非磁性層と強磁性層からなる二層膜において、一方向性スピンホール磁気抵抗効果 (USMR)を用いた磁気センサ開発が期待されている。USMRは、磁化がスピン流のスピン偏極の向きに対して平行または反平行であるかによって抵抗が変化する現象であり、磁化方向の検出に利用できることから、その効率向上は応用上重要な課題である。USMR効率の増強には、電流-スピン流変換効率の高い非磁性層とスピン分極率の高い磁性層の選択が鍵となる。これまでに、非磁性層として5d遷移金属Ptやトポロジカル絶縁体を用いた研究が精力的に行われてきた。本研究では、高いスピン分極率を有するハーフメタルのペロブスカイト型マンガン酸化物La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃ (LSMO)を磁性層として着目した。はじめに、LSMOとの格子整合性が良好な(La_{0.3}Sr_{0.7})-(Al_{0.65}Ta_{0.35})O₃ (LSAT)(001)基板を選択することで、高品質なエピタキシャルLSMO薄膜を作製した。その後、LSMO上にPtを成膜することでPt/LSMO二層膜を作製し、ホールバー型デバイスに加工した。外部磁場中でデバイスの二倍波縦抵抗の角度依存性を測定することでUSMRに起因する明瞭な信号を観測した。引き続いて、Pt及びLSMO薄膜の膜厚依存性と電流依存性を系統的に調査することで、スピン流によるマグノン変調の寄与は見られず、界面付近におけるスピン蓄積の寄与がUSMR機構において支配的であることを明らかにした。さらに、最大で0.062%のUSMR率が得られ、金属二層膜Co/Pt [1]と比較して約2倍の大きさを持つことが示された。これらの結果は、二層膜におけるUSMRの微視的機構の理解を深め、デバイス応用に向けてマンガン酸化物の有用性を示す成果である。

[1] C. O. Avci, *et al.* Nat. Phys. **11**, 570 (2015).

エピタキシャル $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜における成膜圧力の磁気ダンピングへの影響

森 祐輔 松野研究室 (物理学専攻)

近年スピントロニクス分野において、スピン波を量子化したマグノンが、省電力磁気デバイス開発に貢献する可能性から注目されている。マグノンの長距離輸送の実現には、磁化運動における磁気ダンピング定数 (以下、ダンピング定数) が重要なパラメータとなる。磁性絶縁体酸化物 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) は、一般的な強磁性金属に比べて小さなダンピング定数を有することから、マグノンデバイス作製において中心的な材料として盛んに研究されている。先行研究では、YIG 薄膜のダンピング定数が成膜時のアルゴン (Ar) 圧に依存することが報告されているが [1]、その微視的な機構は未だ明らかとなっていない。本研究では、YIG 薄膜の格子定数とダンピング定数の相関に着目し、成膜条件がダンピング定数に及ぼす影響を明らかにする。

我々は以前、マグネトロンスパッタ法を用いた YIG 薄膜の合成において、室温で堆積した後、大気中アニールにより結晶化に成功した [2]。本研究では、同様の方法を用いて、堆積時の Ar 圧 P_{Ar} が異なる YIG 薄膜を $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GGG) (111) 基板上に作製した。バルク YIG と GGG の格子不整合は 0.06% である。格子定数とダンピング定数の評価には、X 線回折と強磁性共鳴法をそれぞれ用いた。全ての P_{Ar} 領域において YIG 薄膜と GGG 基板の面内格子定数が一致するコヒーレント成長が確認された一方で、 $P_{\text{Ar}} \leq 2.0 \text{ Pa}$ の領域では、 P_{Ar} 減少に伴い、面直格子定数の減少やダンピング定数の増大が観測された。この結果は、YIG 薄膜において組成ずれに起因する格子欠陥が、ダンピング定数に強い影響を及ぼすことを示唆している。これにより、YIG 薄膜を用いた省電力マグノンデバイスの開発に貢献することが期待される。

[1] H. Chang *et al.*, IEEE Magn. Lett. **5**, 4 (2014).

[2] K. Fukushima *et al.*, Appl. Phys. Lett. **121**, 232403 (2022).

$\text{CeTe}_{2-x}\text{Sb}_x$ における磁化の多段転移と異方的な巨大磁気抵抗効果の研究

前田 涼太 花咲研究室 (物理学専攻)

層状磁性半導体 $\text{CeTe}_{2-x}\text{Sb}_x$ では c 軸方向を容易軸とする強い磁気異方性を持つが、4K 以下では局在磁気モーメントが c 軸方向に平行または反平行にそろった磁性層が Sb 置換量に応じて複雑な周期で積層配列する。この状態を反映して、磁場中では強制強磁性状態に達するまでの間で磁化が多彩な多段転移をすることが観測されている [1]。電気伝導特性については磁化の増加過程で巨大な負の磁気抵抗効果が発現する例が報告されているものの [2]、Sb 置換が電気伝導特性に与える影響については十分な理解が得られていない。本研究では、新たに x が異なる 4 種類の $\text{CeTe}_{2-x}\text{Sb}_x$ 単結晶を合成し、低温領域における磁化の多段転移と負の磁気抵抗効果との関係について詳細に調べた。全ての試料においてキャリア密度は $10^{17}\text{cm}^{-3} \sim 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 程度と希薄であり、強制強磁性状態に至るまでに磁化の多段転移とそれに伴う負の磁気抵抗効果が観測された。特に、 $x=0.34$ の試料では 2K において 6 桁に迫る突出した規模での電気抵抗率の減少が観測された。この試料ではキャリア密度は温度に依存しておらず、降温に伴う電気抵抗率の上昇は電荷キャリアの移動度の変化を純粹に反映したものである。さらに、低温における磁気特性にも従来の試料とは明瞭な差異が観測されている。組成分析の結果は磁性層の Te が部分的に Sb で置換されていることを示唆しており、これにより磁気ポーラロンの形成が促進された可能性が考えられる。

[1] R. Singha *et al.*, Adv. Mater. **33**, 2103476 (2021)

[2] H. Murakawa *et al.*, Phys. Rev. Mater. **6**, 054604 (2022).

スピネル型酸化物 $MgTi_2O_4$ における元素置換効果と局所構造

見里 朝彦 花咲研究室 (物理学専攻)

スピネル型酸化物 $MgTi_2O_4$ は Ti がパイロクロア格子を作り、 $S=1/2$ のスピンを持つ量子スピンのフラストレート系である。しかし実際には 260K 付近で立方晶から正方晶へ構造相転移を起こし^[1]フラストレーションが解消されてしまう。正方晶相ではスピンシングレットを組み、Ti が変位している。この変位の仕方はアイスルールを満たす 2in-2out 型であるが、Ti 二量体は規則的に並ぶ長距離秩序を伴っている。また先行研究から Ti サイトを部分的に Mg 置換することで Valence bond crystal が融解し、スピン液体的挙動が示された^[2]。しかし Mg 置換の効果には「スピンの欠陥(Ti の価数変化)」の他に Ti サイトの「構造的な乱れ」の効果も含まれてしまっている。そこで Ti の価数のみを変化させることを目的として、Mg サイトの一部を Li 置換した試料の合成を行った。

$(Mg_{1-x}Li_x)Ti_2O_4$ を固相反応法により合成を行い、複数の置換量の試料について調査を行った。正方晶相への相転移の抑制が、Mg 置換のときよりも少ない置換量で起こっていることを放射光 X 線回折により確認した。また EXAFS と中性子 PDF 解析を行うことによって立方晶相において正方晶的な構造が局所的に存在し、その正方晶型構造の相関長は Mg 置換のときと比較して大きく変わらないことを明らかにした。

[1] M. Isobe and Y. Ueda, J. Phys. Soc. Jpn. 71, 1848 (2002).

[2] S. Torigoe *et al.*, Phys. Rev. B 98, 134443 (2018).

フェムト秒レーザーを用いた飛行時間型質量分析装置のイオン源の改良と評価

濱口 哲朗 豊田研究室 (物理学専攻)

質量分析のイオン化法の一つにレーザーを用いたものがある。主にナノ秒パルスレーザーが採用されているが、フェムト秒パルスレーザーを用いたイオン化についても研究がなされている。パルス幅が狭く尖頭出力が高い特徴を活かした高強度光によるアブレーションに関する研究が多くなされてきたが、近年生体試料などのレーザー脱離イオン化によるソフトなイオン化を目指した研究もされはじめている。そこで本研究では、フェムト秒レーザー光によるイオン化メカニズムの研究を行える装置の開発とその評価を行った。当研究室で開発したフェムト秒レーザー光を導入できる飛行時間型質量分析装置は、試料を交換するために 都度真空を破らなければならず、また真空内で位置調整をする機構もなかったため、様々な試料の測定を効率よく行えなかった。そこで本研究において、複数のサンプルを一度に導入し、ベローズシール方式の直線導入機により真空下で移動できるように改良したイオン源を設計・製作した。このイオン源を用いて、非常に弱いフェムト秒レーザー光を照射して、アミノ酸 (アラニン、アルギニン、フェニルアラニン) などの試料の測定を行い評価した。その結果アミノ酸由来と考えられるイオンの検出に成功した。

希土類元素の三角形ネットワークを持つ新規磁性体の開発

浦矢 郁人 工藤研究室 (物理学専攻)

磁性元素からなる三角形ネットワークを持つ物質では、幾何学的フラストレーションに起因して、複雑な磁気秩序、スピングラス[1]、スピン液体[2]、スキルミオン[3]のようなエキゾチックな磁気状態が実現しうる。幾何学的フラストレーションを有する新規磁性体を開発することは、これらの非自明な磁気状態を探求する新たな舞台の発見につながるため重要である。

本研究では、遷移金属の配位化学に基づき配位多面体を作る原子ネットワークについて検討した。その後、それらを層状に積層させてできる層状物質の対称性を考えることで、原子の三角形ネットワークを含む構造を導いた。これらの検討を行いながら物質合成を進めた結果、希土類元素の三角形ネットワークを有する新しい化合物の開発に成功した。単結晶 X 線構造解析によって結晶構造を決定し、開発した 6 つの化合物が希土類元素の三角形ネットワークを有していることを明らかにした。磁化の温度依存性と磁場依存性を測定した結果、強い磁気フラストレーションのために低温まで秩序化しない系、傾角反強磁性を示す系、複数の磁気転移を含む複雑な磁気相図を示す系が得られていることが分かった。これらは、新奇磁性を探索する新しい舞台となりうる。

[1] A. P. Ramirez, G. P. Espinosa, and A. S. Cooper, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 2070 (1990).

[2] L. Balents, *Nature* **464**, 199 (2010).

[3] T. Kurumaji, T. Nakajima, M. Hirschberger, A. Kikkawa, Y. Yamasaki, H. Sagayama, H. Nakao, Y. Taguchi, T. Arima, and Y. Tokura, *Science* **365**, 914 (2019).

122 型鉄系超伝導体における 化学結合の形成と切断を利用した超伝導転移温度の上昇

岡 宏大 工藤研究室 (物理学専攻)

122 型鉄系超伝導体 $AeFe_2Pn_2$ (Ae : アルカリ土類金属, Pn : ニクトゲン)は、 $FePn$ 層と Ae イオンの層の交互積層からなる。化学置換、温度、圧力の制御により、 $FePn$ 層間に $Pn-Pn$ の化学結合を形成したり切断したりできる[1, 2, 3]。この化学結合が形成されるとき、 c 軸長が急激に縮み、構造が潰れるような構造相転移が起こる。この転移は一次相転移であり、格子コラプス転移と呼ばれる。一般に、格子コラプス転移すると、超伝導は消失する[1, 2]。一方で、転移近傍において、高い転移温度 T_c の超伝導が発現する可能性も示唆されている[4, 5]。本研究では、一次相転移の臨界状態に着目し、 $Pn-Pn$ の化学結合の形成と切断の揺らぎが T_c を高めるとの仮説を立てた。その仮説のもと、122 型への化学置換により格子コラプス転移がクロスオーバー的な変化へ転じている相を探索し、転移の系統的な変化と超伝導の関係を調べた。

電気抵抗率の温度依存性と格子定数の組成依存性から、 c 軸長が縮むほど、格子コラプス転移温度 T_{CT} と T_c が上昇することが分かった。電気抵抗率の温度依存性を解析した結果、 c 軸長が短くなると、格子コラプス転移前後の中間にあたるような状態が実現していることが示唆された。そのような c 軸長を持つ試料において、本研究における最高 T_c を観測した。この結果は、化学結合の形成と切断の揺らぎが超伝導に強く影響している可能性を示唆する。

[1] S. Kasahara, *et al.*, *Phys. Rev. B* **83**, 060505(R) (2011).

[2] M. Danura, K. Kudo, *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, 103701 (2011).

[3] A. Kreyssig, *et al.*, *Phys. Rev. B* **78**, 184517 (2008).

[4] S. R. Saha, *et al.*, *Phys. Rev. B* **85**, 024525 (2012).

[5] K. Kudo, *et al.*, *Sci. Rep.* **3**, 1478 (2013).

三角形ネットワークを持つ Eu 化合物の価数転移と磁性

菊池 遊 工藤研究室 (物理学専攻)

磁性元素間に反強磁性相互作用が働く三角形ネットワークでは、フラストレーションに起因して、スピングラス[1]、スピン液体[2]、スキルミオン[3]などの様々な興味深い磁氣的基底状態が発現することがある。本研究では、磁性元素からなる三角形ネットワークへランダムネスの効果を加えることで、さらなる新奇磁性を探索する舞台を見出すことを目的とした。

三角形ネットワークを構成する磁性元素として Eu を選んだ。その理由は、2 価と 3 価のエネルギーが近く、価数転移が起こるためである。Eu²⁺が磁性イオン、Eu³⁺が非磁性イオンであるため、2 価から 3 価への価数転移を利用すれば、ランダムネスとして磁気モーメントの欠損を導入することができる。研究の対象とした物質は私たちのグループで発見した Eu 化合物である[4]。その系では、これまでに、磁化の温度依存性から価数転移が示唆されていた[4]。本研究では、X 線吸収微細構造 (XAFS) 実験を行い、価数転移を直接観測することに成功した。磁化の温度依存性は、低温で折れ曲がりを示す[4]。磁性イオンの Eu²⁺の一部が非磁性イオンの Eu³⁺に変化することで三角形ネットワークのフラストレーションが弱められ、磁気転移が起こったと考えられる。

[1] Z. Ma, J. Wang, Z.-Y. Dong, J. Zhang, S. Li, S.-H. Zheng, Y. Yu, W. Wang, L. Che, K. Ran, S. Bao, Z. Cai, P. Čermák, A. Schneidewind, S. Yano, J. S. Gardner, X. Lu, S.-L. Yu, J.-M. Liu, S. Li, J.-X. Li, and J. Wen, *Phys. Rev. Lett.*, **120**, 087201 (2018).

[2] Y. Shimizu, K. Miyagawa, K. Kanoda, M. Maesato, and G. Saito, *Phys. Rev. B* **73**, 140407 (2003).

[3] T. Kurumaji, T. Nakajima, M. Hirschberger, A. Kikkawa, Y. Yamasaki, H. Sagayama, H. Nakao, Y. Taguchi, T. Arima, and Y. Tokura, *Science* **365**, 914 (2019).

[4] 真鍋馨, 修士論文 (2024), M. Manabe, Y. Kikuchi, K. Kudo *et al.*, in preparation.

複数の配位多面体を有する遷移金属化合物の新超伝導体開発

眞崎 世間 工藤研究室 (物理学専攻)

d 遷移金属は、四面体、八面体、平面四角形など様々な配位多面体を形成する[1,2]。価電子の少ない p ブロック元素は、様々な原子ネットワークを示す[1]。本研究では、これらの特性を利用した物質開発を行うために、遷移金属として Pt、 p ブロック元素として Ge を用いた。さらに、原子間を近づけてネットワークの多様性を誘起するために、イオン半径の小さい元素を加えた。このような物質開発を進めた結果、三つの新物質を発見することができた。一つ目は、Pt の周りに Ge が 4 配位した四面体と、Pt の周りに Ge が 5 配位した正方ピラミッドを含む化合物であり、転移温度 $T_c = 6$ K の超伝導を示した。二つ目は、一つ目の新化合物の構造が歪んだ派生構造を持ち、1.8 K まで超伝導を示さなかった。三つ目は、歪んだ四面体と歪んだ正方ピラミッドを持ち、転移温度 $T_c = 2$ K の超伝導を示した。これらの超伝導体では、結晶構造の安定性、電子数、構成元素の大きさに依存して、大きく T_c が変わる。選択する元素によって生じる結晶構造の多様性と相まって、興味深い超伝導物質開発の舞台となった。

[1] Ulrich Müller, *Inorganic Structural Chemistry*, John Wiley & Sons (2006).

[2] Rainer Pöttgen, Dirk Johrendt, *Intermetallics, Synthesis, Structure, Function*, De Gruyter (2014).

1111 系鉄系超伝導体母物質 $\text{NdFeAs}_{1-x}\text{P}_x\text{O}$ の磁気構造・結晶構造の研究

韓 成徳 工藤研究室 (物理学専攻)

1111 系の鉄系超伝導体である LaFeAsO では As を P に置換することで磁気・結晶構造がストライプ型反強磁性・直方晶状態から、ヘッジホッグ型・正方晶状態、さらにダブル-Q 型反強磁性・正方晶状態に変化する。O サイトを F で置換し電子ドーピングを行うと、それぞれの反強磁性相近傍で超伝導が発現する。しかし、La 以外のランタノイド元素を含む 1111 系の P 置換した母物質では、磁気構造などの詳細な物性が明らかになっていない。そこで La を Nd に変えた NdFeAsO の As を P に置換し、その P 置換量の変化に伴い磁気構造や結晶構造がどのように変化するかを、実験的に明らかにすることを研究目的とした。本研究により、1111 系母物質の磁気秩序及び結晶構造を解明し、それら秩序相の近傍で出現する超伝導のメカニズムに関する新たな情報が得られると考えた。

本研究では $\text{NdFeAs}_{1-x}\text{P}_x\text{O}$ 多結晶試料を作製し、中性子散乱実験や放射光 X 線回折実験を行うことで磁気構造と結晶構造について調べた。その結果、 $x=0$ から $x=0.2$ までの試料では昇温過程で直方晶から正方晶への相転移が見られた。 $x=0.3$ 以上の試料では、低温まで結晶構造は正方晶であった。一方、 $x=0.2$ までは低温で明確にストライプ型反強磁性が現れ、 $x=0.4$ 以降ではヘッジホッグ型もしくはダブル-Q 型反強磁性へと磁気構造が変化することが判明した。この結果からストライプ型反強磁性状態と直方晶状態、ヘッジホッグ型/ダブル-Q 型反強磁性状態と正方晶状態が強く関連していることが判明した。また、本研究で Nd1111 系母物質における磁気・結晶構造の違いが、それら秩序相近傍において出現する超伝導機構を、変化させている可能性が示唆された。

Se ドープ PtBi_2 薄膜における超伝導特性とスピン輸送特性

寒川 雄斗 新見研究室 (物理学専攻)

空間反転対称性の破れた極性構造をもつ Trigonal- PtBi_2 ($P31m$, C_{3v}^2 , No.157) は、Bi サイトの一部を Se に置換することで空間反転対称性を保つ非極性構造 ($P\bar{3}m1$, D_{3d}^3 , No.164) へと構造相転移し、それに伴い超伝導転移温度 T_c が 0.6 K から 2.4 K へと上昇することが報告されたが[1]、確かな T_c 上昇機構は解明されていない。さらにこの新奇超伝導体 $\text{Pt}(\text{Bi}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ は、重金属の化合物であることから大きなスピン軌道相互作用を持つと期待でき、今後の超伝導スピントロニクス研究の格好の舞台となる可能性を秘めている。

そこで本研究では電気伝導測定により $\text{Pt}(\text{Bi}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ 薄膜の超伝導特性とスピン輸送測定のそれぞれを調べた。まず、超伝導領域から常伝導領域に至るまでの磁気抵抗測定を行ったところ、図のように上部臨界磁場近傍で磁気抵抗に明瞭なヒステリシスを観測した。このヒステリシスは前の状態を引きずるような従来のヒステリシスとは異なり、超伝導から常伝導に壊れるときは低磁場側を、常伝導から超伝導に戻るときは高磁場側を通るのが特徴的である。このヒステリシスは、超伝導の不均一な系に適用可能な、Two-level critical-state モデル[2]により説明ができることがわかった。スピン輸送測定では $\text{Pt}(\text{Bi}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ と Py の二層構造素子を作製し、スピントルク強磁性共鳴法により、室温下における $\text{Pt}(\text{Bi}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ のスピン輸送特性を評価した。当日はこれらの結果の詳細を報告する。

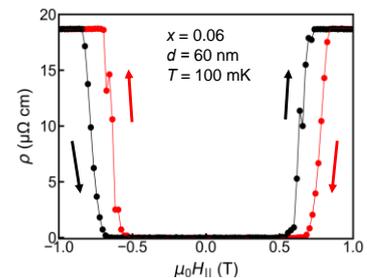


図: 磁気抵抗測定の結果。

[1] K. Takaki *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 034703 (2022).

[2] L. Ji *et al.*, Phys. Rev. B **47**, 470 (1993).

4f 電子系ファンデルワールス磁性体薄膜における磁気輸送特性

東原 有 新見研究室 (物理学専攻)

ファンデルワールス磁性体は、次元性に由来するユニークな磁気構造、さらに対称性や物性の異なる物質を組み合わせ、新規物性を開拓するといった自由度の高さを持ち、基礎物性、デバイス応用の両面から盛んに研究されている。

ファンデルワールス物質に対する旺盛な物質開拓の一方で、特にデバイス応用として、またスピントロニクス研究として重要な輸送現象を評価するのに適した、金属的なファンデルワールス磁性体は、数種類の 3d 電子系化合物に限定されている。代表的な磁性化合物としては d 電子系以外にも f 電子系化合物が存在し、大きなスピン軌道相互作用、遍歴電子と内殻に配置している局在電子スピンの混成効果によって、多様な電子・磁気秩序状態が共存・競合しあうという特徴から、長年バルク試料で研究がなされてきた。

このような魅力的な特性があるにもかかわらず、新しい有望な層状物質として、f 電子系化合物を探索することには、ほとんど注目されていないように思える。将来の原子層デバイスの多機能化のためには、従来の薄膜磁性体に加えて、多様な物性を含む新しい 4f 電子系のファンデルワールス磁性体の基本的な物性を調べておくことには大きな意味がある。

よって本研究では、2 種類の希土類ファンデルワールス物質、 $R\text{Te}_3$ 属と、 GdGaI に対して輸送測定を行い、基礎的な電気伝導特性を明らかにすることを目的とした。ファンデルワールス反強磁性体 $R\text{Te}_3$ は圧力誘起超電導、結晶構造と強く結合した CDW 秩序、低温での非自明な磁気構造といった多彩な秩序層を内包しており、本研究では特に、磁気転移がフェルミ面に及ぼす変調を量子振動解析から明らかにした。また GdGaI は非共面的な磁気構造を有するファンデルワールス半導体であり、スピンカイラリティ由来と思われる大きな異常ホール効果を観測した。本発表では、作製した素子や測定結果の詳細について報告する。

強磁性層を持つ薄膜超伝導体における抵抗の Little-Parks 振動の観測

松本 史弥 新見研究室 (物理学専攻)

Bi と Ni を二層構造で積層させたエピタキシャル Bi/Ni 薄膜は約 4 K で超伝導を示す。さらに超伝導転移後も Ni 層が強磁性を保つことや[1]、Bi 表面でのスピン偏極した超伝導状態が確認されていることから[2]、非従来型超伝導体であることが期待される。近年報告されたエピタキシャル Bi/Ni リング型素子における Little-Parks (LP) 振動の測定結果では、整数量子化磁束から半整数量子化磁束への位相シフトが観測されており、この現象は、①単一ドメインのカイラル p 波超伝導、②スピン軌道相互作用、③Ni 層の面内磁化、を仮定することで説明できると考えられている[3]。一方で、「エピタキシャル Bi/Ni のリング型素子が単一ドメインで形成されているのか」といった疑問や「Ni 層の磁化による影響のみでも位相シフトが起きるのではないか」という意見も存在する。

そこで本研究では、エピタキシャル Bi/Ni のリング型素子が単一ドメインであると示すことを第一の目的として、リング内に多数のドメインが存在する多結晶 Bi/Ni のリング型素子における LP 振動の観測を行った。さらに、Ni 層の磁化の影響のみで位相シフトが起きるのか調査することを第二の目的として、従来型超伝導体である Nb と強磁性体である Ni を重ね合わせた Nb/Ni のリング型素子における LP 振動の観測を行ったのでその結果を報告する。

[1] H. Zhou *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.* **422**, 73 (2017).

[2] X. X. Gong *et al.*, *Sci. Adv.* **3**, e1602579 (2017).

[3] M. Tokuda *et al.*, submitted.

ファンデルワールス三角格子反強磁性体 $\text{Fe}_2\text{Ga}_2\text{S}_5$ における輸送測定

山口 優陽 新見研究室 (物理学専攻)

一般に、三角格子反強磁性体は低次元性と幾何学的フラストレーションによる非自明な磁気構造に由来した豊富な磁気輸送特性を示すことが期待される。しかし、電気伝導性を持つ物質が少なく、詳細な測定は不十分である。 $\text{Fe}_2\text{Ga}_2\text{S}_5$ は、層間がファンデルワールス力で結合した層状物質であり、半導体的な輸送特性を示す三角格子反強磁性体の数少ない例である[1]。また、最近の中性子回折による磁気構造解析から、三角格子を形成する Fe の磁気モーメントは 120 度構造を取ることが分かっている。

本研究では、機械的剥離法によって $\text{Fe}_2\text{Ga}_2\text{S}_5$ の薄膜素子を作製し、抵抗率の温度依存性から $T_N = 113 \text{ K}$ での反強磁性転移を確認した (図 1)。さらに、磁気転移温度以下でホール抵抗及び磁気抵抗を測定し、磁場方向に依存して符号変化する磁気抵抗を観測した。この傾向は、反強磁性転移温度以下で低温ほど増強する。以上の結果は、外部磁場によるバンド構造の変調を反映した結果であると考えられ、 $\text{Fe}_2\text{Ga}_2\text{S}_5$ の磁性が電気輸送に影響を及ぼしていることを示唆するものである。発表では、これらの結果の詳細と今後の展望について報告する。

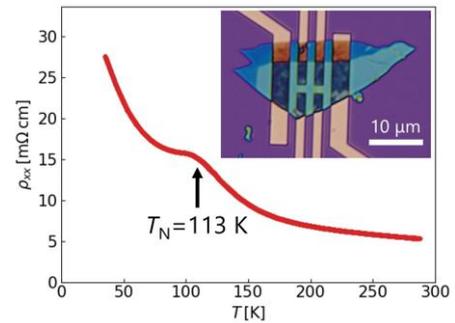


図 1. $\text{Fe}_2\text{Ga}_2\text{S}_5$ 薄膜の抵抗率の温度依存性と素子の光学顕微鏡像。

[1] T. Tomita *et al.*, JPSJ 78, 094603 (2009).

励起子イオン化率の自己無撞着計算による電子正孔系における励起子モット転移の理解

井上 恭輔 浅野研究室 (物理学専攻)

半導体を光で強励起し、伝導帯に電子、価電子帯に正孔 (電子の抜け孔) を多数生成すると、電子と正孔が再結合するまでの時間スケールで、同数の電子と正孔の集団が熱平衡に達した状態を実現できる。この熱平衡状態は密度 (電子と正孔で共通) と温度で指定される。ここで、電子と正孔が束縛状態 (励起子) を作るとこれは電氣的に中性なので電気を運べないが、解離してプラズマになると電気を運べる。両状態間の変化に伴う相転移やクロスオーバーは、絶縁体と金属間の変化なので、励起子 Mott 転移・クロスオーバーと呼ばれる。本発表ではこの現象を扱う手法として、Snoko と Crawford が提案したもの[1]を検証する。

この手法では、電子と正孔がプラズマか、励起子の基底状態かのいずれかの状態をとると仮定し、Mott クロスオーバー・相転移の指標として励起子のイオン化率 (全キャリアの内プラズマ化したものの割合) に着目して、クーロン相互作用の効果は励起子形成においてのみ考慮する。具体的には、①プラズマ化した電子と正孔だけが相互作用の遮蔽に寄与すると仮定して Thomas-Fermi 近似で遮蔽定数を決める。②遮蔽された相互作用を使って励起子の束縛エネルギーを決める。③励起子束縛エネルギーを Planck-Larkin の補正を入れた Saha 方程式に代入して、そこから励起子イオン化率を決める (同時にプラズマ化した電子と正孔の密度が決まる)。という三つの作業を通じて、各密度と温度における励起子イオン化率、遮蔽定数、励起子の束縛エネルギーを自己無撞着に決定する。

その結果、温度を固定して密度を低密度から高密度へ変えると、①高温ではイオン化率が一旦減少してから増大に転じるクロスオーバー的な振る舞いを示すこと、②低温ではイオン化率がヒステリシスを示して相転移的な振る舞いを示すことを確認できた。

[1] D. W. Snoko and J. W. Crawford: Phys. Rev. E 52, 5796 (1995).

金属板近傍に置いた擬一次元電子正孔少数多体系の研究

西 裕介 浅野研究室 (物理学専攻)

半導体で実現する電子正孔少数多体系を金属に近づけると、鏡像電荷の影響によって、励起子複合体の束縛エネルギーが変化する。本研究では、T型およびV型量子細線を念頭に、一層および二層構造の擬一次元半導体を金属版に近づけたときの、励起子、励起子分子、(一価)荷電励起子、二価荷電励起子の束縛状態を、数値的対角化によって求めて、それらの安定性を調べた。

低次元電子正孔系は、バンド端での結合状態密度の増強を反映して、低キャリア密度でも大きな光学利得が得られるので、低閾値レーザーデバイスへの応用が期待されている。しかし、低次元性は同時に励起子を安定化し、自由キャリアの生成を阻む。これに対し、金属板を近づけると、二次元系の励起子の束縛エネルギーが、金属板との距離の指数関数で減少するという先行研究がある[1]。今回、より低次元な一層構造の量子細線に金属板を近づけたところ、全ての電子正孔少数多体系の束縛エネルギーが金属との距離の二次関数の形で減少するものの、完全な不安定化には至らないことを明らかにした。

一方、二次元の二層半導体に金属板を近づけると、三電子と一正孔の束縛状態である二価荷電励起子を実現することが古典計算で示唆されている[2]。これは荷電ボゾン粒子なので、高温超伝導の実現につながると期待されている。本研究では多谷半導体量子細線を想定し、Pauli 排他律の制限を緩和した上で計算をおこなった。その結果、二価荷電励起子の束縛エネルギーは極めて小さいが、特定の距離で最大値を取ることが分かった。本発表では、量子細線を二層構造にすることで起こる変化や対分布関数、質量比の影響についても論じる。

[1] C. B. Guillaume, M. Combescot, O. Betbeder-Matibet: *Solid State Comm.***108**, 193 (1998).

[2] V. I. Yudson: *Phys. Rev. Lett.* **77**, 1564 (1996).

非一様な一次元ハバードモデルに対するクラスター摂動法の応用

松木 海登 浅野研究室 (物理学専攻)

クラスター摂動論(cluster perturbation theory: CPT)は、格子系を有限サイズのクラスターに分割し、クラスター内では相互作用の効果を厳密に扱い、クラスター間の要素を摂動として取り入れることで局所相関を精度良く採り入れた Green 関数を近似的に得る手法である。従来、CPT では系の並進対称性を利用した波数表示の Green 関数を扱っていたが、本研究ではこれを非一様な系に適用可能な実空間 CPT へ拡張し、実際に二次関数型のサイトポテンシャル下での一次元 Hubbard モデルに適用して、その特性を調べた。

まず、実空間 CPT を一様系に適用し、従来の CPT と同等の結果が得られることを確認した。また、従来形式の CPT で一様一次元 Hubbard モデルの一電子スペクトル $A(k, \omega)$ を広い占有率範囲で求め、スピノンやホロン励起の分散、シャドウバンド、ダブロンバンドなど、動的 DMRG を用いた先行研究の結果を定量的に再現できることを確認した。

更に、二次関数型のサイトポテンシャルを印加した系について、実空間 CPT を用いて各サイトでの局所状態密度を求めた。そして、各サイト上の電子数を占有率に読み替えたとき、これが一様系の状態密度と一致することを見出した。その結果、一度の計算で、占有率を連続的に変化させた場合の一様系の状態密度の構造を追跡でき、一次元 Hubbard モデルの一電子スペクトル強度の盛衰やモットギャップの開き方を精密にとらえることに成功した。

ハニカム格子反強磁性体(Cu_{1-x}Zn_x)₂(pymca)₃(ClO₄)の強磁場磁性

井上 祥 萩原研究室 (物理学専攻)

Cu₂(pymca)₃(ClO₄)は pymca (pyrimidine-2-carboxylate) で架橋された Cu²⁺イオン($S=1/2$) がハニカム格子を組む金属錯体化合物である[1]。この物質は、等しい反強磁性相互作用を有するボン드로構成されると考えられていたが[1]、詳細な構造解析により異なる3種類の反強磁性ボン드로構成されることがわかった[2]。また、比熱測定から 0.6 K まで磁気秩序が観測されていない[3]。強磁場磁化過程では、約 15 T までほぼ磁化が出ず、約 20 T から 1/3 磁化プラトー、55 T 付近に 2/3 磁化プラトーが観測されている[3]。低磁場での振る舞いは、3種類の反強磁性ボンドのうち大きさがほぼ等しい2種類のボンと弱い1種類のボンドを考慮することで説明されている[4]。本研究では、この物質の非磁性基底状態の詳細を調べるために、Cu²⁺イオンを非磁性の Zn²⁺イオンで置換した (Cu_{1-x}Zn_x)₂(pymca)₃(ClO₄) ($x=0, 0.034, 0.053, 0.085, 0.163$)粉末試料の磁化率、強磁場磁化、電子スピン共鳴の測定を行った。母物質($x=0$)に比べ Zn²⁺で置換した試料の磁化過程は、 x を大きくするほどゼロ磁場近傍で磁化の立ち上がりが大きく観測された。これについて、Cu²⁺と Zn²⁺の存在確率から磁化の値を求める確率計算と、MC (Monte Carlo) + Annealing 法を用いて非磁性不純物によって出てくるフリースピンの磁化を求める数値計算で解析を行った。本講演では、この計算結果の詳細を報告し、この物質の磁性、特に零磁場近傍の基底状態について議論する。

[1] Z. Honda *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 034601(2015).

[2] K. Sugawara *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 123302 (2017).

[3] A. Okutani *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 013703 (2019).

[4] T. Shimokawa *et al.*, Phys. Rev. B **106**, 134410 (2022).

三角格子磁性体 NiBr₂ の強磁場物性

山下 慧 萩原研究室 (物理学専攻)

NiBr₂は三方晶系の層状の結晶構造を持ち、 ab 面でNi²⁺が三角格子を形成する。Ni²⁺ ($S=1$) イオンが磁性を担い、 $T_N=44$ K 以下では、面内で共線的な強磁性、面間で反強磁性磁気秩序 (AFM 相) を示し、 $T_{IC}=22.8$ K 以下で非整合なサイクロイド磁気秩序 (IC 相) を示すことが報告されている[1,2]。後者の磁気秩序に伴う自発電気分極が観測され、 ab 面に磁場を印加した場合はIC相内でのみマルチフェロイック特性を示す[2]。 ab 面に磁場を印加した強磁場磁化 (1.3 K, $H \perp c$) は、 $H_1=2.6$ T でIC相からAFM相への相転移に対応した跳びを示し、 $H_2=31.5$ T でFan相への相転移を示すと考えられており、その後 $H_3=32.9$ T で磁化が飽和する [3,4]。 c 軸方向に磁場を印加した飽和磁場までの強磁場磁化過程は報告されていない。本研究では、NiBr₂の磁場誘起相についての知見、及び飽和磁場を含む磁場-温度相図を得るために、我々が合成したNiBr₂の単結晶試料を用いて、様々な温度におけるパルス強磁場下での磁化および電気分極測定、定常磁場下での磁化率、磁化および電子スピン共鳴 (ESR) 測定を行った。 ab 面に磁場を印加した様々な温度での強磁場磁化測定から、Fan相は40~50 Kの間で消滅することがわかった。電気分極測定 ($H \parallel c, P \perp c$) では、33.3 T (1.4 K) まで面内の電気分極が観測され、高磁場まで面内はサイクロイド磁気構造を示すことが明らかになった。また、ESR測定で求められた共鳴モードと磁化過程を再現する交換相互作用定数や磁気異方性パラメーターを決定した。その結果、これらは過去に報告されているものと異なることが分かった。本発表では、これらの詳細について報告する。

[1] A. Adam *et al.*, Solid State Commun. **35**, 1 (1980). [2] Y. Tokunaga *et al.*, Phys. Rev. B. **84**, 060406(R) (2011). [3] K. Katsumata *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **52**, 3313 (1983). [4] H. Yoshiyama *et al.*, J. Phys. C: Solid State Phys. **17**, 713 (1984).

ホール素子を用いたパルス強磁場中磁化測定装置の開発

新正 朋暉 萩原研究室（物理学専攻）

今日の非破壊型パルスマグネットをもちいる磁化測定では誘導法が一般的である。誘導法は（メリット）の反面、磁化や磁場の微分値を積分することで決定しているため、磁場掃引中のみでしか測定ができないことはもちろん、緩やかな磁化の変化や外部磁場のピーク地では感度が悪くなることや、強磁性体の自発磁化を観測することは不可能であることに課題がある。そこで、磁場に対して線形に電圧が出力されるホール素子を用いた磁化測定装置の開発を行った。本研究で測定した磁化測定装置は、ホール素子を磁化測定用と磁場測定用の2つを用意し、磁化測定用素子から磁場測定用素子のホール電圧を差し引くことで、電氣的に磁場成分をキャンセルし、磁化のみの信号を検出する原理を用いている。

測定では、まずホール素子のホール電圧の室温中と液体窒素中でのホール電圧を測定することで、同一種のホール素子の中でも、磁場、温度特性の近い素子の選別をした。また、パルスマグネット内での径方向、鉛直方向の磁場の位置依存性の測定を行い、ホール素子を鉛直方向(**Vertical** 配置)、水平方向(**Horizontal** 配置)の2つ適切な配置を決定し、2種のプローブを作製した。そのプローブを用いて、2つのホール素子のパルス磁場中でのホール電圧の差分が誘導法と比べ、どの程度されたかを定量的に議論した。また、NdFeB を試料として採用し、作製した2種のプローブを用いた磁化測定を行い、これも誘導法によって測定された磁化測定と比較を行った。

物理学専攻
物性グループ

会場：D403

2月13日(木)

深層ニューラルネットワークにおけるカオス相頑健相転移

吉田 桃大 吉野研究室 (物理学専攻)

ランダムニューラルネットワークにおけるカオスは数十年にわたって多くの関心を集めてきた[1]。特に、同じシナプス結合を持つ二つの feedforward 型の深層ランダムニューラルネットワークにわずかに異なる入力データを与えると、層を進むにつれてデータの相関 (隠れ層におけるニューロンの発火パタン) が指数関数的に減衰するカオス効果が存在することが知られている[2][3]。このようなランダムニューラルネットワークは表現力が高い利点を持つ一方で、そのカオス性ゆえにノイズに対して非常に弱いという問題点もある。しかし、実用的に用いられている深層ニューラルネットワークは高い表現能力を保ちつつ、ノイズに対して強い頑健性を持つ。そこで、我々はこの問題の示唆を得るために、ランダムニューラルネットワークにヘブ則的 (パターンは一つ) なバイアスを加えたニューラルネットワークの解析を行なった。本研究では長方形の feedforward 型深層ニューラルネットワークを、絶対零度極限における層状にスピンの配置されたスピングラスモデルとして扱い、レプリカ法を用いて解析した[4][5]。その結果、バイアスの大きさがある値よりも大きくなるとニューラルネットワークがカオス相から頑健相に 2 次相転移することを発見した。

[1]H. Sompolinsky, A. Crisanti, and H. J. Sommers, PRL 61, 259 (1988).

[2]B. Poole, S. Lahiri, M. Raghu, J. Sohl-Dickstein, and S. Ganguli. NIPS 29 (2016).

[3]Yuki Okazaki master's thesis(Osaka Univ., 2020)

[4]H. Yoshino, Phys. Rev. Research 5, 033068 (2023).

[5]E. Domany, W. Kinzel and R. Meir, J. Phys. A: Math. Gen. 22(1989) 2081.

レーザー生成高エネルギー密度プラズマでのエネルギー輸送構造形成の研究

小松 伴行 非平衡輻射プラズマ理論グループ (物理学専攻)

集光強度が $10^{18}[\text{W}/\text{cm}^2]$ を超える相対論的強度のレーザー光を固体に照射すると、固体密度・keV 温度のプラズマを生成できる。レーザー照射面で加速された電子が固体内部にエネルギーを輸送し、高密度プラズマ中に抵抗性磁場が生成されるとともにプラズマの高温化が進む。抵抗性磁場が十分に成長すると加速された電子がガイドされ電子の発散が抑えられることで、プラズマのより深くまでエネルギーを輸送することができる。このようなレーザー生成の高温高密度プラズマのエネルギー輸送は複雑であり、レーザー加速された高エネルギー電子によって駆動される衝突のない現象と、バルクプラズマ内の衝突プロセスの両方が含まれる。輸送構造は、高温高密度プラズマ内の磁場の進化を決定する抵抗率に依存することが知られている。また、抵抗性磁場の大きさについては、固体の価数やレーザー条件への依存性が理論的に明らかにされている。しかし、磁場の成長過程で現れるフィラメント形状やその時間発展などの詳細な構造を決定する物理は明らかになっていない。

本研究では、相対論的強度レーザーによって照射された固体ターゲットのエネルギー輸送構造の時間的变化を、理論的に研究した。そこで、一般化されたオームの法則を用い、固体密度プラズマ中の電流の時間変化を記述する方程式を導出した。エネルギー輸送の経路を表す電流構造は、加熱プロセスとともに時間的に変化するプラズマ抵抗率と電子圧の空間分布に依存して形成される。イオン化を含む 2 次元 PIC シミュレーションによってモデルを確認し、ターゲット内のエネルギー流束との関係と、それぞれ低、中、高抵抗率を持つプラスチック(CH)、アルミニウム(Al)、銅(Cu)の材料への依存性について議論した。

高密度プラズマ中の運動論的エネルギー輸送の研究

奥田 直樹 非平衡輻射プラズマ理論グループ (物理学専攻)

プラズマへの相対論的高強度レーザーの照射により臨界密度近傍の電子は物質内部に向かって加速され、高密度領域に最高エネルギーが数百 MeV に及ぶ非熱的な電子集団で構成された強いエネルギーフラックスが誘起される。この高速電子群による高密度プラズマ中のエネルギー輸送過程は高エネルギー密度プラズマ生成、特に慣性核融合において重要である。衝突周波数の運動エネルギー依存性により、プラズマの加熱効率は高速電子のエネルギー帯に応じて変化する。例えば、高速点火方式では数百 keV のエネルギー帯の電子を増やすことがターゲットの効率的加熱につながると考えられている。本研究では高速電子群の加熱に加えて、比較的低エネルギー帯のバルク電子による拡散的なエネルギー輸送に着目する。一様密度プラズマ内部における、拡散輸送と非局所輸送の中間に相当するパラメータ領域の熱輸送現象を一次元プラズマ粒子シミュレーションを用いて調べた。熱流の輸送係数の温度依存性は既存理論の 2.5 乗の冪よりも弱い 1.5 乗程度の冪を示した。これは温度上昇とともに非局所輸送の役割が強くなり局所的な熱輸送が抑制される効果を表している。さらに非局所輸送の役割が顕著となる高速点火レーザー核融合における非一様高密度プラズマ中のエネルギー輸送を解析した。二次元プラズマ粒子シミュレーションでは、非熱電子の広範囲・準定常的な加熱を背景に進展する加熱フロント構造の形成が見られた。この物理を明らかにするため、非局所加熱と熱拡散方程式を同時に計算するシミュレーションモデルを新しく構築した。拡散による加熱が高密度プラズマ中で卓越し、非局所加熱された領域の熱を高密度プラズマ内部へと輸送する役割を担うこと、それにより加熱フロントの高速伝播が起こることがわかった。さらにこの高速伝播が起こるために必要な非熱的粒子のフラックスを理論的に求めた。本研究成果は効率的な高エネルギー密度状態の実現に寄与するものである。

超臨界密度プラズマにおける相対論的レーザー光の伝播過程の研究

柳川 颯斗 千徳研究室 (物理学専攻)

高効率なレーザー核融合の方式として、高密度圧縮された燃料を高強度レーザーパルスにより加熱・点火する高速点火方式が提案されている。レーザーにより爆縮された高密度燃料コアはコロナプラズマに覆われており、加熱レーザーパルスのプラズマ中の伝播特性を理解することが重要である。レーザー光は単色の電磁波であり、その周波数に応じて伝播可能な臨界プラズマ密度が存在する。相対論的強度とよばれる高強度レーザーがプラズマ中を伝播するとき、レーザー光電磁場中の電子の質量が相対論的效果で実効的に重くなることで、臨界プラズマ密度を超えてレーザー光は伝播できる (相対論的透過性)。一方でプラズマ中のエネルギー散逸により光の群速度は低下するが、高強度レーザーの高い光子圧によってプラズマを押し退け、導波路を形成し光は進み続ける (ホールボーリング)。これまで、ホールボーリング過程は、光圧力とプラズマ圧力のバランスを考えた 1 次元モデルにより議論されてきたが、多次元効果の理解は未だ確立されていない。また、相対論的透過性からホールボーリング過程への遷移がどのように起こるのかは十分に理解されていない。本研究は、プラズマ粒子シミュレーション (PIC) を用いて、相対論的透過領域からホールボーリング領域への遷移過程を含めて、プラズマ中の高強度レーザーの伝播特性を明らかにすることを目的としている。まず、1 次元 PIC シミュレーションを用いて、それらの領域間の遷移について調べた。また、相対論的透過領域でのレーザーフロントの速度がエネルギー損失のため、理論で予測された群速度より遅いことを確認した。次に、2 次元 PIC シミュレーションを行い、レーザーパルス先端に強磁場が励起され、イオンが磁場で反射されることで、導波路形成が早いことが明らかになった。シミュレーション結果を踏まえ磁場効果を考慮した多次元伝播モデルを構築した。新たなモデルは 2 次元シミュレーションの電磁波の伝播速度と良い一致を見た。

時間分解低速電子エネルギー損失分光法の開発

西原 快人 木村研究室 (物理学専攻)

フォノンに代表される集団励起は、強相関電子系などにおいて高温超伝導を含む特異な物性を発現させる。そのような集団励起と電子状態の素励起は、非弾性散乱した電子のエネルギーや運動量を測定する電子エネルギー損失分光法(Electron Energy-Loss Spectroscopy: EELS)で観測できる。また、弾性散乱成分を測定することで格子構造も同時に観測できる。我々は、更に比較的低いエネルギー(0.3-1.5 keV)に加速した低速電子線を用いることで、強相関電子系を構成する元素(遷移金属、希土類元素)に対する元素選択的な測定によって物性の起源となる元素を特定しながら、素励起と格子構造を1回の測定で同時に観測することを可能にする低速 EELS の開発を行っている[1]。

本研究では更なる拡張として、光励起後の素励起と格子構造の超高速ダイナミクスの同時観測を可能とするために、フォトカソードをパルスレーザー励起して光電子として得たパルス電子線を測定に用いる時間分解低速 EELS を開発した。

具体的には、角度分解可能なセットアップへのアップデート、機械学習を用いた電子線軌道制御による輝度向上(1.4 倍)、Cu(111)キャリアプラズモン分散の角度分解測定(デモンストレーション)、時間分解光学系(12-30 m 光学ディレイライン)の構築、パルス電子線の作製(エネルギー分解能 ~ 2 eV(実験値)、時間分解能 ~ 1 ps(計算値))を行い、時間分解測定が可能な段階である。今後、素励起と格子構造のダイナミクス観測への応用を行う計画である。

[1] S. Kimura *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **92**, 093103 (2021).

交替磁性体のスピン流電流変換観測のための テラヘルツ超高速電流検出法の開発

藤井 聡志 木村研究室(物理学専攻)

近年、スピントロニクス材料を用いた超高速のスピン流から電流への変換技術が重要視され、その候補物質として交替磁性体 (Altermagnet) が注目されている。Altermagnet は、反強磁性体に似た磁気秩序を持つにも関わらず、スピン偏極したバンド構造を持つ特徴があるため、高効率なスピン電流変換が可能と考えられている。しかし、変換された電流の寿命は約 1 ピコ秒と短く、直接電流計などで観測するのが難しい。そこで我々は電流の時間変化によって生じる電磁放射に着目し、試料から発生するテラヘルツ(THz)放射を観測する非接触かつ超高速な電流検出法の開発を行った。また、一般にスピン流電流変換に用いられる薄膜試料は大気下ではすぐに劣化するため、試料作製を行う超高真空チャンバー内の試料を直接観測する必要がある。そこで、真空チャンバーに隣接させて THz 観測の光学系の構築を行った。まず、一般に THz 光源として用いられる GaP からの THz 放射スペクトルを観測したところ Hz 波が問題なく観測できることを確認した。さらに Altermagnet である MnTe のスピン流電流変換の観測に先立ち、それ以外の原因で THz 放射が起こるかを調べる為に、MnTe 単結晶からの THz 波放射を観測した。その結果、微弱な THz 波しか検出されずスピン流電流変換由来の THz 放射実験にほとんど影響を示さないことが分かった。今後は、スピン流電流変換を起こすために MnTe 単結晶の上に Fe を蒸着し、その THz 放射から Altermagnet におけるスピン流電流変換を評価していく計画である。

光子スピン変換効率の増幅に向けた ブルズアイ共振器構造を持つ半導体量子ドット構造の作製と評価

小西 優太 大岩研究室 (物理学専攻)

半導体量子ドット中の電子スピンによる量子ビットは制御性、コヒーレンス時間、集積性に優れているため、量子コンピュータの実現候補として注目を浴びている。また、遠く離れたスピン量子コンピュータを接続するために、光子偏光を通信の媒体とし単一光子から単一スピンへの変換により量子通信を行うための基礎研究がなされてきた。現在では単一光子偏光から単一電子スピンへの角運動量転写は実現されているが、その変換効率は 10^{-5} ~ 10^{-4} 程度であり[1]、量子通信の確立には大きな隔たりがある。

この変換効率を向上するため、ブルズアイ型微小共振器構造を量子ドット周辺に置くことで量子ドット基板に照射される光強度の分布を量子ドットに強く集中させる手法が提案されている[2]。一方で、架橋構造の形成の際に利用されるフッ酸(HF)エッチングによるゲート電極の剥離、ブルズアイ共振器構造中に作製するために要求される特殊な量子ドット形状、また通常利用される量子井戸基板より高い電子濃度に起因する電気輸送特性があり、課題となっていた。これらの問題を解決するには、デバイス作製における設計、手順の見直し、共振器構造のないデバイス (ベアデバイス) による電気輸送特性の評価、利用する量子井戸基板での量子ポイントコンタクト(QPC)特性の評価などを行う必要がある。

本研究では、ゲート幅を従来の構造より太くしたデバイスを作製し、HF エッチングによる電極への影響を調べた。その結果、ゲート電極の大きな剥離は観測されなかった。また、ゲート電極の幅を変更したデバイスに関して、ベアデバイスと共振器構造を持つデバイスをそれぞれ作製し、その電気輸送特性を測定した。本発表では、ゲート幅の変更によるエッチング耐性の評価とその電気輸送特性への影響、及びベアデバイス、共振器構造を持つデバイスの電気輸送特性を報告する。

[1] Phys. Rev. B **99**, 085203(2019). [2] Jpn. J. Appl. Phys. **60**, 102003(2021).

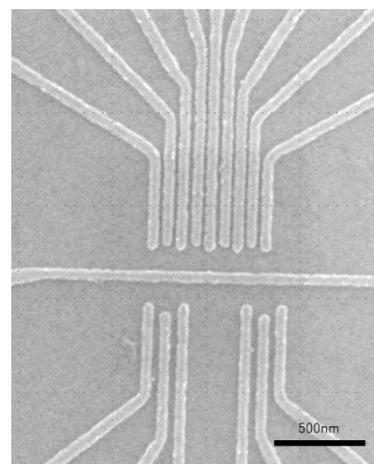
GaAs の 1 次元量子ドット配列における非局所二量子ビットゲート操作

千田 健一郎 大岩研究室 (物理学専攻)

半導体量子ドットにおける電子スピン量子ビットは、従来の半導体微細加工技術との高い互換性を有するだけでなく、近年では理化学研究所において 3 量子ビットゲートを用いた誤り訂正が実証されるなど、その制御技術が着実に進展している。この制御の実証により、半導体量子ビットは大規模量子コンピュータの実現に向けた有力な候補として注目されている。

現在、半導体量子コンピュータの開発において、量子ビットの集積化が主要な課題として残されている。従来、半導体量子ビットは隣接する量子ドット間の直接交換相互作用を活用して電子操作を行っているが、基底状態だけでなく励起状態にも着目することで、超交換相互作用を介した非隣接ドット間での中距離電子操作を検討している。

本研究では、SEM 写真に示すような楕円電極を用いて一次元量子ドット配列を有するデバイスを作製している。本デバイスを用いた制御 NOT ゲートのシミュレーション結果、および現在進行中のデバイス調整について報告する。この成果は、半導体量子ビットの中距離相互作用を利用した集積化技術の発展に向けた重要なステップとなっている。



Ray-based automated tuning of four single quantum dots in a GaAs/AlGaAs device

Ehsan Alizadeh Kashtiban Oiwa Lab (Physics)

Semiconductor quantum dots (QDs) are a promising platform for scalable quantum computing due to their compatibility with nanofabrication techniques and CMOS electronics. However, manual tuning of gate voltages to form and control individual QDs becomes prohibitively time-consuming as qubit numbers scale. In this thesis we address this challenge by developing an automated tuning method for single QD formation.

Inspired by the Ray-Based Classification framework, we propose a closed-loop algorithm that navigates the multidimensional gate voltage space using targeted 1D voltage sweeps ("rays"), requiring only gate design parameters and a single central gate depletion value as prior knowledge.

We demonstrate the algorithm's effectiveness in forming four single quantum dots separately within a quadruple dot array fabricated from a GaAs/AlGaAs heterostructure. Our work demonstrates that machine learning combined with minimal one-dimensional voltage sweeps provides a practical framework for automatic single quantum dot formation.

梯子型モット絶縁体における光誘起ペアリング状態の理論的研究

植田 涼太 黒木研究室 (物理学専攻)

外場照射は、相関電子系において平衡状態から離れた興味深い現象を誘起・制御するための強力なツールである。特にモットハバード系においては光励起により非平衡系特有の η ペアリング状態、つまりオンサイトペアがスタグガードに長距離相関を示す固有状態を誘起することが出来る。キャリアの観点から外場照射を考えると、大きなギャップを持つモット絶縁体における光照射は、ダブロン（二重占有）とホロン（空孔）という複数キャリアが共存した準定常状態（光ドーブ系）を生成する。

最近、ニッケル酸化物における高温超伝導の発見、また梯子型光格子における磁気媒介ホールペア形成の実現が、二層系、梯子系の物理に関する新たな知見をもたらしている。これらの系に存在する強い鎖間（層間）スピン交換相互作用がラング方向におけるスピナー重項の形成を促進し、系へのホールドーブがスピナー重項背景に由来するホール-ホールペアの形成をもたらすという重要な機構は、近年再び注目を集めている。

そこで本論文では、梯子型のモット絶縁体における光誘起ペアリング状態について理論的研究を行った。まず、厳密対角化に基づく時間発展法を用いて、光照射されたハバードラダーモデルにおける η ペアリング状態を解析し、強い鎖間ホッピングがラング的な強い η ペアリングを誘起することがわかった。この強い鎖間ホッピングの領域において η ペアリングが発生する起源を、局所ラング近似を用いて議論した。また、密度行列繰り込み群法を用いて、光ドーブされた梯子型モット絶縁体におけるダブロン-ホロン (DH) ペアリング状態について調べた。我々は相図を描き、ダブロン密度が小さい、大きい領域に現れるスピナー重項相、 η ペアリング/電荷密度波相の間に、DH ペアリング相が存在することを見出した。この DH ペアリング相関はスタグガードな符号変化を示すが、そのメカニズムを明らかにした。

BC₃ 層間化合物の電子状態と熱電性能の 理論研究

榎並 龍太郎 黒木研究室 (物理学専攻)

近年、二次元物質は超伝導、熱電変換、電池などの分野における次世代材料として、盛んに研究がなされている。また、低次元系は三次元系に比べてバンド端の状態密度が高く、高い熱電変換効率を期待できるため、物質の低次元性を活用することが高効率の熱電物質を探索するうえでの一つの指針となっている。二次元物質の一つである monolayer BC₃は、グラフェンのC原子を一部B原子に置換した構造を持ち、電池材料としての理論研究がおこなわれている一方で、熱電材料の方面からの研究はされていない。

そこで、本研究ではBC₃の熱電特性を第一原理的に研究した。まず、monolayer BC₃はグラフェンの van Hove 特異点を起源とする状態密度の大きいバンド端をもつことが研究により明らかになった。しかし、monolayer BC₃を積層した bulk BC₃ではkz方向のバンド分散が大きく、バンド構造が大きく変形してしまう。また、bulk BC₃では電気特性が金属的になってしまうことが実験的に確認されている。これらの問題を解決し、さらに、熱電性能の最適化のために電子ドーピングをするべく、アルカリ元素をBC₃層間に挿入した物質の構造を考えた。第一原理計算で安定な構造を探したうえで、ボルツマン輸送方程式により熱電計算を行った。その結果、monolayer BC₃のバンド構造がある程度保たれ、高い熱電性能を期待できることが分かった。

ニッケル系超伝導体 La₃Ni₂O₇ における 非線形フォノンクスを用いた光誘起構造制御

神山 周 黒木研究室 (物理学専攻)

二層ニッケル酸化物 La₃Ni₂O₇における超伝導は、面間の Ni-O-Ni 結合角が圧力によって直線状に変化した際に現れ、結晶構造と超伝導出現に強い相関があることが示唆されている。本研究では、圧力の代わりに光照射によって結合角が直線に近づくような結晶構造の制御の方法を、非線形フォノンクスのアイデアを用いて理論的に提案した。非線形フォノンクスとは、物質中の格子振動であるフォノンに光励起した際に、フォノン間の非調和な結合を利用することで、結晶構造を制御する方法である。赤外活性 (IR) フォノンに光励起した際に、フォノン間の非調和結合によって、Raman モードの非線形な振動が誘起され、時間平均を考えた際に結晶構造に一時的な変化が生じたと捉えることができる。

本研究ではまず、第一原理計算によって La₃Ni₂O₇の非調和ポテンシャルを計算した。また得られたポテンシャルをもとに、光照射した際のフォノンモードの時間発展を計算し、結晶構造における Ni-O-Ni 結合角の時間変化を計算した。その結果、光によって励起させる IR モードを適切に選択すれば、面間の Ni-O-Ni 結合角がわずかに直線状に変化することがわかった。本研究の結果は La₃Ni₂O₇の光照射による結晶構造制御の方法を提案したものとなっている。

ドーピングされたバンド絶縁体における円偏光周期外場下の超伝導ペア形成

高橋 佑瑚 黒木研 (物理学専攻)

光を用いた物性制御の研究が発展している。周期駆動系においてはフロケ理論が活用され、光の効果を取り込んだ有効モデルによって従来にない超伝導ペア状態の誘起などが議論されている[1]。フロケ理論の舞台として、ドーピングされたバンド絶縁体[2]に着目した。副格子間ポテンシャルを有するハニカム格子上的の相関電子系(図 1)を用いて、斥力相互作用によって得られる有効相互作用を考慮し、円偏光照射下での有効モデルを導出した。二次摂動によって得られる有効ホッピングが光の効果で複素数になり、有効モデルパラメータが駆動外場の周波数と振幅によって調整可能であることを示した。さらに、有効相互作用を増強するのに最適な周波数帯を特定した(図 2)。超伝導ペア形成のメカニズムを調べるために二体問題を数値的に解き、束縛状態を解析した。有効相互作用が増強される周波数帯で束縛状態が強化されることと超伝導の対称性が外場下であっても保たれることを示した。本研究は、光駆動によって強相関電子系における超伝導状態を強くできる可能性を提示する。

[参考文献] [1] S. Kitamura and H. Aoki, *Commun Phys* 5, 174 (2022), [2] V. Crépel and L. Fu, *Sci. Adv.* 7, eabh2233 (2021)

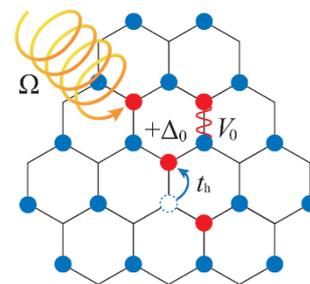


図 1: 円偏光照射下の相関系

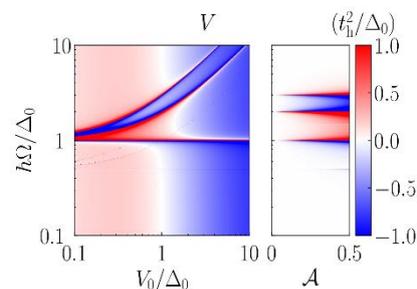


図 2: 有効相互作用の外場依存性

外部周期ポテンシャル下のねじれ2層グラフェンの電子状態

河邊 潤 越野研究室 (物理学専攻)

ねじれ2層グラフェンの各層に電場による電位差を加えた系では、1次元的なエネルギーバンドが複数出現することがわかっている[1]。そのようなバンド構造を持つ系ではフェルミ面のネスティングが強く起こり、密度波を形成することで安定な状態へと遷移する可能性を示唆している。

本研究ではそのような密度波形成の可能性を探るため、上記のようなねじれ2層グラフェンに周期的なポテンシャルを加えた系について理論的研究を行った。その結果、通常のコラー周期を拡張した新たな周期のねじれ2層グラフェンにおいて、それと同じ周期を持つポテンシャルを加えると複数のエネルギーギャップが形成されることが判明した。これらのエネルギーギャップは電場による電位差の大きさによりその個数が変化し、それらの形成についてねじれ2層グラフェンの積層角と各パラメータの間に関係性があることが判明した。

本発表では、以上の事柄について強束縛模型を用いた計算結果と交えて報告する。

[1] Bonnie Tsim, Nguyen N. T. Nam and Mikito Koshino, *PHYSICAL REVIEW B* 101, 125409 (2020).

3次元グラファイトツイスト接合系における電子状態の理論的研究

園 悠希 越野研究室 (物理学専攻)

二次元物質をツイスト積層した物質群をモアレ積層系という。最も基本的なモアレ積層系はツイスト二層グラフェン(twisted bilayer graphene, TBG)で、魔法角と呼ばれる特別なツイスト角において平坦バンドを生じ、これに起因する超伝導状態[1]などの特異な物性が明らかにされている。二層以上の積層物質のモアレ積層系も興味を持たれており、その代表例は二組の AB 二層グラフェンをツイスト積層したツイスト二層二層グラフェン(twisted double bilayer graphene, TDBG)である。TDBG は TBG と同じ魔法角において平坦バンドを生じる一方、垂直電場の印加によって魔法角以外でも平坦バンドを実現する[2]など、TBG とは異なる特性も知られる。

本研究では、従来の TBG(1層+1層),TDBG(2層+2層)の有効理論を拡張し、N層+N層ツイスト多層グラフェン(twisted multilayer graphene, TMG)の電子構造と波動関数を系統的に調べた。3層以上の積層グラフェンには ABA 積層・ABC 積層と呼ばれる二種類の積層様式が存在するが、本研究の対象は ABA-N層+ABA-N層の TMG および ABC-N層+ABC-N層の TMG である。ABA 積層 TMG には積層数 N によらない平坦バンドが現れ、これがツイスト界面付近にのみ局在した特異な電子状態であることを示した。ABC 積層 TMG では、ABC 積層グラフェン特有のトポロジカル表面状態同士がモアレ結合することにより、多数の平坦バンドが低エネルギー領域に現れることを明らかにした。

[1] Cao, et al. Nature, Vol. 556, No. 7699(2018) [2] Cao, et al. Nature, Vol. 583, No. 7815(2020)

宇宙地球科学専攻

会場：D303

2月12日（水）

自己相互作用的ダークマターの矮小銀河の潮汐効果に対する影響

木原 健司 長峯研究室 (宇宙地球科学専攻)

これまでの観測や宇宙論的シミュレーションによって、ダークマター (DM) が全体の物質のエネルギー密度の約 85% を占め、重力相互作用を行い、現在の銀河の形成の基礎となったことが示唆されている。ところが、DM の素粒子的素性はまだ明らかになっていない。その手掛かりとして、銀河の星やガスの運動から DM の質量分布を予測し、シミュレーションと比較することで、DM の物理的性質に制限をつけるという手法がある。ここで DM が重力相互作用のみを行うと仮定してシミュレーションを行うと、矮小銀河の観測による DM の密度分布予測と異なる結果となる (コアカサブ問題)。この観測と理論の不一致を解決するための有力なモデルの 1 つが、自己相互作用的ダークマター (Self-Interacting Dark Matter, SIDM) である。SIDM では、DM 同士が非重力的な相互作用をし散乱することで、銀河の中心領域に低密度のコアを形成し、観測と整合する可能性がある。

本研究では散乱断面積が速度に依存する SIDM のモデルを実装し、完全に自己無撞着な N 体シミュレーションを用いて、矮小銀河がそのホスト銀河から潮汐力を受けて DM を失う過程における散乱の影響を調べた。その結果、初期密度分布を NFW プロファイルにした場合、散乱が強くなるにつれて DM をより多く失うことが分かった。一方で、初期密度分布を Burkert プロファイルに変更すると、散乱が弱いほうが DM を多く失うという逆の結果が得られた。これは初期状態と散乱によって DM の密度分布が多様化することを示唆し、宇宙論的シミュレーションによる統計的な初期条件の実現が必要となると言える。

活動銀河核円盤風からのマルチメッセンジャー放射モデルの構築と

宇宙ガンマ線・ニュートリノ背景放射への寄与

坂井 延行 長峯研究室 (宇宙地球科学専攻)

超巨大ブラックホールへのガス降着によって輝く活動銀河核の一種であるセイファート銀河からガンマ線が観測され始めている。この放射メカニズムの解明は、活動銀河核における粒子加速解明に不可欠であり、その候補として星形成や弱いジェット、活動銀河核円盤風が挙げられているが、よく分かっていない。そこで我々は、X 線観測から存在が示唆されている活動銀河核円盤風に着目し、円盤風と星間物質の相互作用による衝撃波で加速された宇宙線からの、ガンマ線やニュートリノを含めたマルチメッセンジャー放射モデルを構築した。本研究では、まず本モデルを用いて、星形成活動とジェットが弱いにも関わらず GeV ガンマ線で検出されているセイファート銀河 GRS 1734-292 の多波長データを再現することに成功した。また、円盤風に由来する電波放射が示唆されている 11 個のセイファート銀河のマルチメッセンジャースペクトルを計算することで、将来のガンマ線観測での検出可能性を議論し、さらに活動銀河核円盤風の宇宙ガンマ線・ニュートリノ背景放射への寄与も見積もった。その結果、GRS 1734-292 は将来の TeV ガンマ線望遠鏡 CTA での検出が期待される一方で、円盤風に由来する電波放射が示唆されている 11 個のセイファート銀河の検出可能性は低いことが分かった。また、宇宙ガンマ線・ニュートリノ背景放射への寄与は 10% 未満であることが分かった。

3 次元流体計算を用いた大質量連星系の共通外層期における軌道進化の研究

水谷 耕介 長峯研究室 (宇宙地球科学専攻)

重力波放射を伴うブラックホール連星合体をはじめ、多くの高エネルギー現象は近接連星系によって駆動される。このような近接連星系の形成には、連星間距離を効率的に縮める過程である共通外層期が重要であると考えられている。しかし、共通外層期は非線形な流体现象でありその解析的な取り扱いが困難であるため、連星進化学理論における不定性として残されている。これまでに共通外層期を対象とした3次元流体計算がいくつか行われてきたが、そのほとんどが小質量星に焦点を当てていた。大質量星では輻射圧の効果が重要となるが、未だ十分な調査はされていない。そこで本研究では大質量星で起こる共通外層期に焦点を当て、輻射圧の影響を調査する。特に連星の軌道進化と、ガス放出の力学的構造のそれぞれに与える影響に注目する。この目的のために、我々は輻射圧を状態方程式に組み込んだ3次元流体計算を実施し、共通外層期における連星軌道進化を詳細に調査した。輻射圧を考慮しない計算では、共通外層期へ入った連星の連星間距離が急激に減少し、最終的にほぼ円軌道を持つ近接連星が形成されることを確認した。この計算で見られる特徴は過去の研究とおおむね整合的であり、連星間距離の縮小が質量移動と質量損失によって進むことが確認された。また、輻射圧を考慮した計算では、連星の軌道が円軌道から楕円軌道へと変化する現象がみられた。同計算において星内部の密度偏りの励起・成長と軌道離心率の相関が確認された。数値的な影響についてはまだ考察中であるものの、連星軌道の角運動量進化が連星相互作用による星内部の密度偏りの励起に影響を受ける可能性が示唆された。放出物に関する結果として、輻射圧を考慮しない計算では放出物が脱出速度にほとんど達していないのに対して、輻射圧を考慮した計算では脱出速度を超える放出物が見られた。この結果は、輻射圧を考慮したモデルでは伴星が主星の浅い層までしか侵入しなかったため、連星の軌道エネルギーが比較的低密度なガスにのみ受け渡されたことが原因で起きたと解釈している。本研究は、大質量連星系が小質量連星系と質的に異なる進化経路をとることを示唆している。

砂層から砂を飛ばす際における毛の効果

越智 友都 桂木研究室 (宇宙地球科学専攻)

一部の鳥は自身の身体をメンテナンスするために翼や足などを使って砂を巻き上げ身体にかける砂浴びを行う。砂浴びという行動の物理過程についての研究はこれまでほとんど行われておらず、砂浴び行動に対する鳥の羽毛デザインの機能的な評価もままならない状況である。そこで翼を使った砂浴びのような、単純な毛(繊維束)構造を用いて砂層から砂を飛ばす状況において毛の柔らかさがどのような挙動の違いを生み出すのかを明らかにしたいと考えた。毛や繊維の集合体で砂を飛ばす物理過程はほうきによる掃き掃除とも関連し、この過程の関連する現象は意外に多い。そこで本研究ではブラシを先端に持つ振り子を砂層表面でスイープさせ、砂が飛ぶ挙動を観察した。その結果、以下のことが明らかになった。柔らかい毛を使用した場合、砂層との衝突により毛が大きく変形することで砂が先端にまとまり、毛の弾性により砂が前方に飛ばされる。対して、硬い毛を使用した場合、砂層に衝突した際の毛の変形が小さいため砂は衝突時に鉛直上方に積層され、その後振り子の慣性から運動量を受け取り前方に飛ばされる。このような噴出挙動の違いを詳細に分析することで、柔らかい毛は砂を砂層から速く低く飛ばすことに長けており、硬い毛は砂を砂層から大量に高く飛ばすことに長けていることが明らかになった。これらの結果をもとに、鳥が砂浴びのために砂を効率的に巻き上げる条件や、ほこりを飛び散らさない掃き掃除の条件などについても検討を行った。

熱水表面温度制御による浮遊水滴の挙動解析

國料 彩香里 桂木研究室 (宇宙地球科学専攻)

水滴が熱固体や熱水表面上で蒸発・凝縮しながら浮遊・消滅する現象は、ライデンフロスト効果などの代表例をはじめとして、微小スケールでの蒸発や熱流体挙動を理解する上で極めて重要である。こうした現象に関する知見は、冷却技術やマイクロ流体管理などの産業応用にも広く役立つため、学術的・工学的観点の両面から研究が進められている。本研究では特に熱水表面上に浮遊する微小水滴に焦点を当てる。従来の研究で、水面温度に応じて水滴が浮遊・消滅する機構についての解析は一定程度進んでいるものの、水面温度が高温から低温へ、あるいは低温から高温へ変化する動的環境下における水滴の挙動は十分に解明されていない。本研究の目的は、熱水表面の温度変化が水滴の浮遊・消滅挙動に与える影響を実験的に観測し、その挙動を説明するモデルを提案することである。

実験では、同時刻同位置での熱水表面の温度分布と水滴の挙動を観測することで、熱水表面の低温領域で水滴が消滅していることを確認した。熱水表面には対流の影響で生じる筋状の低温領域が存在し、この筋状低温領域が消滅の要因となっていることを意味する。また、一定温度の水面上で水滴は長時間浮遊するが、水面温度を低下させると水滴が水面に向かって落下する現象が観察された。その際、水滴の半径と落下にかかる時間には明確な負の相関が認められた。逆に、水面温度を上昇させると、水滴の浮遊高さが最大で約 $10\mu\text{m}$ 程度上昇することも確認した。これらの結果を説明するために、温度に依存する粘性流体のストークス抵抗を考慮したモデルを導入し、実験結果を定性的に再現可能であることを明らかにした。

ドライアイスを混合した砂山の昇華による形状変化

松本 波音季 桂木研究室 (宇宙地球科学専攻)

彗星や火星表面などには、氷やドライアイスといった揮発性物質が多く含まれる環境が存在する。このような環境においてドライアイス等の成分が昇華すると、残された表土成分が形成する地形は安定性を失い、崩壊や流動化などによる特徴的な地形変化を起こす。このような過程による天体表面地形の進化は、太陽系内の至る所で起こっていると考えられるが、これまでその系統的研究は十分に行われてこなかった。そこで本研究では、ドライアイスと砂を混合した砂山地形がドライアイスの昇華によりどのように変化（地形進化）するかについて調べるための基礎的実験研究を行った。特に揮発性成分が全て昇華した状態の地形から、初期の地形状態を推定するための指針を得ることを目的とした。

実験では、「砂とドライアイスの初期質量比（含氷率）、初期砂山地形の作成方法などを変化させ様々な砂山を作成し、それぞれの地形進化をカメラで撮影した。撮影されたデータの画像解析により、砂山プロファイルを特徴づける形状パラメータを計測し、ドライアイスが完全に消化した最終状態と初期砂山地形の間で、それらの形状パラメータ間に相関関係等がみられるかを確認した。結果として、最終地形を特徴づける形状パラメータは、初期砂山の含氷率 ϕ_0 の影響を最も強く受けていることが明らかになった。具体的には、 ϕ_0 が大きくなるにつれて砂山の最終地形は平坦性を増すことがデータの分析から明確に示された。以上の実験結果に基づき、最終地形の形状パラメータから初期含氷率 ϕ_0 を推定する関係式を得た。ただし、実際の天体地形への適用を考えると、本研究の実験は精度・データ量ともに十分ではない。実験系の改良、天体地形への応用等が今後の課題となる。

弱い青色光による大腸菌の不活化と適応的突然変異

松本 和海 桂木研究室（宇宙地球科学専攻）

微生物の多くは、青色光下で培養すると生存率が低下する。これは、生体内に存在するフラビンなどの光増感物質が青色光を吸収し、活性酸素種（ROS）を生成することが原因だと考えられている。生成された ROS は微生物の増殖を抑制（不活化）するとともに、突然変異を引き起こす。

本研究では、0–0.12 mW/cm² の弱い青色光照射下で大腸菌（DH5α 株）を培養した時の大腸菌の増殖や突然変異について調査した。その結果、わずか 0.03 mW/cm²（100 lux 程度の照度に対応）の弱い青色光強度下で培養した時でも、大腸菌が形成したコロニー数は暗中和比較して半減した。さらに、0.1 mW/cm²（机上程度の照度に対応）の青色光強度下で形成された大腸菌（青色光耐性株）のコロニー数は、暗中で形成されたコロニー数の約 5%にまで低下した。この青色光耐性株を同強度の青色光下で培養した場合のコロニー形成数は、暗中で培養した場合の約 80%であった。これらの結果から、青色光耐性株は青色光下でも増殖可能な突然変異株であると考えられた。また、この青色光耐性株は、野生株よりも青色光照射した場合の ROS の生成量が少なく、菌体内のフラビン量も少ないことが明らかになった。以上の結果は、野生株よりフラビン量が少ない青色光耐性株が、青色光下で優先的に増殖したことを示唆している。このことから、菌体内の主な青色光増感物質はフラビンであり、フラビンにより生成された ROS が大腸菌の不活化と突然変異を誘発することが確かめられた。

本研究は、大腸菌がとても弱い青色光で不活化されることを示している。また、適応的突然変異が短時間で再現よく生じて、耐性菌が生き残ることは驚くに値する。生物はこのように適応的突然変異（進化）して、速やかに新しい環境に適応していく能力を持つと考えられる。

銀河系モデルを用いた、マイクロレンズ惑星頻度の主星質量及び銀河系中心距離依存性の測定

布田 寛介 住研究室（宇宙地球科学専攻）

系外惑星探査手法のひとつである重力マイクロレンズ法は、我々の銀河系内の幅広い領域に存在する、重い惑星から軽い惑星までの様々な惑星を検出することができる唯一の方法で、それらの発見された惑星は、惑星の成り立ちや銀河系の惑星形成史の解明に大きく貢献する。これまで 200 個以上の惑星がこの手法により見つかっており、それらの統計解析から、惑星の存在量やその質量比依存性などが明らかにされてきた。一方で、惑星存在頻度の主星質量依存性はよく調べられていない。これは、ほとんどのマイクロレンズ惑星イベントでは主星の質量を直接測定することが不可能だからである。

本研究では“アインシュタイン時間”と“レンズ・ソース相対固有速度”という、惑星イベントで普遍的に測定される 2 つのパラメータに着目し、それらの二次元の分布と銀河モデルを用いたシミュレーションから予測される分布を比較することで、主星質量の測定を伴わずに、惑星存在量の主星質量依存性を推定できる新たな手法を確立した。その手法を実際の惑星サンプルに適用することで、惑星頻度が主星質量の $0.42+0.48-0.40$ 乗に比例するという結果が得られた。これは、重い星は軽い星に比べて惑星を保有しやすいことを示唆している。発表では新たな解析手法や結果の紹介の他に、2026 年に打ち上げ予定の Roman 宇宙望遠鏡による主星質量依存性へのさらなる制限についても議論する。

離れた増光を持つ惑星候補イベント OGLE-2014-BLG-1367/MOA-bin-116 の 高空間分解能撮像画像解析

永井 堤 住研究室 (宇宙地球科学専攻)

重力マイクロレンズ法は、手前のレンズ天体の重力による背景のソース天体の増光現象を利用した惑星発見手法である。しかし、光度曲線データだけでは、解が縮退してしまうことがあり、増光の数年後に高空間分解能撮像でソースとレンズを分離観測し、ソース天体とレンズ天体の明るさおよび天球面上での相対位置を測定することが有用となる。惑星候補イベント OGLE-2014-BLG-1367 は、2014 年と 2016 年にそれぞれ異なる増光が観測された珍しいイベントである。濱崎修士論文では、光度曲線解析の結果、1S3L(ソース天体が 1 つ、レンズ天体が 3 つ)モデルが 2 つと 2S2L(ソース天体が 2 つ、レンズ天体が 2 つ)モデル 1 つの局所解が縮退していることがわかった。本研究では 2021 年に追観測された Keck 望遠鏡による高空間分解能撮像画像を解析した。点広がり関数(PSF)を精密にモデル化して分析した結果、イベント位置で 3 つの天体が検出された。これらの相対位置は光度曲線から期待される位置関係と一致したことから、ソース星 2 つとレンズ星 1 つ (2S2L モデルの場合) またはソース星 1 つとレンズ星 2 つ (1S3L モデルの場合) と考えられる。イベントに関連する 3 天体が空間分解できた例は初めてであり、特に、最も近い 2 天体の離角は約 10 ミリ秒角と、これまでに分解された離角としては最小である。縮退した 2 つの 1S3L モデルのうち、1 つはソース星の明るさが一致せず、解として不適切であることがわかった。本研究で得られた 3 天体の位置関係と明るさを制限に用いた光度曲線解析によりさらに縮退が解けることが期待される。

離れた増光を持つ惑星候補イベント OGLE-2014-BLG-1367/MOA-bin-116 の 光度曲線解析

濱崎 直人 住研究室 (宇宙地球科学専攻)

重力マイクロレンズ惑星候補イベント OGLE-2014-BLG-1367/MOA-bin-116 の光度曲線解析を行った。本イベントは、2014 年に 1S2L (ソースが 1 つ、レンズが 2 つ) モデルで再現される増光が観測され、その 2 年後に 1S1L モデルで再現される増光が再び観測され、2S2L イベントまたは 1S3L イベントであると解釈できる。

また、2021 年に Keck 望遠鏡による高空間分解能撮像追観測が行われており、永井修士論文による詳細解析の結果、イベント位置で 3 天体が検出され、それらの明るさと天球面上での相対位置が測定された。

本研究では、まず光度曲線データのみを用いてモデルフィッティングを行った結果、2 つの 1S3L モデルと 1 つの 2S2L モデルが縮退する解として得られた。その後、永井修士論文による Keck の画像解析の結果を制限に入れた光度曲線解析を行い、画像データと光度曲線データを同時に再現するような 2S2L モデルを発見した。このモデルから、イベント全体の解釈として、銀河系中心方向に地球から $3.5 +0.034 -0.040$ kpc 離れた場所に、 $0.94 +0.013 -0.016$ 太陽質量をもつ主星の周りを、 $8.22 +0.129 -0.146$ 木星質量をもつ惑星が公転しているレンズ系が位置し、2014 年と 2016 年にそれぞれ別のソース天体がレンズの背景を通過したイベントであると解釈した。

マイクロレンズ惑星候補イベント KMT-2021-BLG-2142/MOA-2021-BLG-333 の相関ノイズを考慮した光度曲線解析 浜田 隼陽 住研究室 (宇宙地球科学専攻)

視線上に二つの天体が重なった際に、手前の天体（レンズ天体）の重力によって奥の天体（ソース天体）が増光される現象を重力マイクロレンズ現象という。レンズ天体が惑星系である場合、増光パターンに特徴的なシグナルが現れるため、光度曲線の解析を通じて惑星系の発見が可能である。本研究では、マイクロレンズ惑星候補イベント KMT-2021-BLG-2142/MOA-2021-BLG-333 の詳細解析を行った。本イベントの光度曲線には、ソース天体の光度変化に起因すると考えられる周期的な相関ノイズが確認された。このため、従来の相関ノイズを考慮しない解析手法では、パラメータを正確に推定できない可能性が懸念された。そこで本研究では、新たにガウス過程を応用し、相関ノイズを考慮した解析手法を考案・実装した。この手法の有用性を検証するため、周期的な相関ノイズを埋め込んだ人工光度曲線に適用したところ、従来手法と比較してより正確にパラメータを推定できることが確認された。さらに、本イベントの光度曲線に対して、ガウス過程を用いた手法および従来の手法でフィッティングを行い、その結果を比較した。その結果、相関ノイズの有無にかかわらず、パラメータの推定値自体は変わらなかったものの、推定値の不定性には違いが確認された。また、レンズ系は $[(0.52)_{-(-0.28)}^{(+0.33)}]$ 太陽質量の主星の周りを質量が $[97.0]_{-(52.4)}^{(+63.2)}$ 地球質量の惑星が公転している系で、地球から $7742_{(-1396)}^{(+968)}$ pc の距離にあることがわかった。本研究は、ガウス過程を用いた新たな解析手法の適用可能性を示すものであり、今後のマイクロレンズイベント解析に適用することで、より正しいパラメータ推定が期待される。

KOI-94 系におけるトランジット時間変動を用いた第 5 惑星の検出 および次回惑星食の推定 坂東 賢 住研究室 (宇宙地球科学専攻)

KOI-94 系は、Kepler 宇宙望遠鏡によって発見された 4 つのトランジット惑星を有する複数惑星系である。この系では、2 つの惑星 (KOI-94d と KOI-94e) が同時にトランジットする際、恒星面上で部分的に重なる「惑星食」と呼ばれる現象が唯一確認されている。惑星食の解析からは軌道要素に対する精密な制限が得られるため、その再観測には大きな意義がある。Masuda et al. (2013; 以下 M13) では、KOI-94 の惑星が示すトランジット時間変動 (TTV; 惑星間の重力相互作用による軌道周期の変動) から決定した系のパラメータに基づき、4 つの惑星間の重力相互作用を考慮した上で、次回の惑星食が 2026 年 4 月 1 日から 2 日の間に発生すると推定した。一方で、M13 の解析では、KOI-94e の TTV が既知の惑星の効果だけでは説明できないことも示された。もしこれが未検出の第 5 惑星に起因する場合、その重力相互作用によって惑星軌道が変化し、予想される次回の惑星食の時刻も変動する可能性がある。そこで本研究では、KOI-94e の TTV を再現可能な第 5 惑星の軌道要素および質量を網羅的に探索し、その惑星が他の惑星に及ぼす重力を考慮した上で、次回惑星食の時刻を再推定した。その結果、第 5 惑星が存在する場合でも、M13 が予測した次回惑星食が発生する可能性が高いことが示された。また、本研究で求めた第 5 惑星の影響を考慮した予測時刻の不定性は次回の観測に有用である。

アクティブ XY モデルにおけるトポロジカル欠陥と凝集現象

井上 駿 波多野研究室 (宇宙地球科学専攻)

鳥や魚の群れのように自らを駆動する要素の集団はアクティブマターと呼ばれ、多様な協同現象を示す。近年では細胞集団がトポロジカル欠陥に集積する例など、アクティブマターの協同現象にはトポロジカル欠陥が重要な役割を果たしていることがわかっている。本研究では、格子点上に固定された古典的な XY モデルと自由空間を動き回れる Vicsek モデルの中間モデルとして、スピンの向きに自らを駆動して動き回れるようにしたアクティブ XY モデルについて考える。古典 XY モデルではトポロジカル欠陥が現れるが、Vicsek モデルではトポロジカル欠陥が与える影響が明らかではない。以上を踏まえて、アクティブ XY モデルにおける自己駆動力とトポロジカル欠陥の関係を調べた。シミュレーションの結果、自己駆動力を大きくすると粒子集団は凝集現象 (MIPS) を引き起こすことが確認できた。そして、凝集現象とトポロジカル欠陥には関係性があり、自己駆動力が大きくなるにつれて粒子は+1 渦欠陥へと凝集し、-1 渦欠陥は系に存在しにくいことが明らかとなった。粒子が系に対して高密度になるにつれ、小さな自己駆動力でも相分離を引き起こすこともわかった。また、凝集現象によって発生するクラスターについても解析した。その結果、安定状態の最大クラスターサイズはシステムサイズに依存せず、粒子密度のみの関数で記述できること、そして最大クラスターサイズの時間発展において、システムサイズの 3 乗が特徴的な時間スケールであることが明らかとなった。

ロトカ・ヴォルテラの競争モデルにおける情報伝達

後藤 竜之介 波多野研究室 (宇宙地球科学専攻)

自然界では複数の生物種が競争関係・捕食被食関係などの複雑な関係性のもとで共存している。それらの種は個体数ゆらぎを伴いながら複雑に相互作用を及ぼし合っているため、個体群のふるまいを正確に予測・制御することは困難である。このようなシステムを正確に予測・制御するためには、種間の影響の度合いを定量的に理解する必要がある。本研究ではその第一歩として、そのような種間の因果関係や影響の度合いを情報理論的枠組みを用いることで定量化することを試みる。

今回の研究では、競争関係にある 2 種の個体数変化を記述する確率的ロトカ・ヴォルテラ競争モデル [1] を考え、種間の情報のやりとりを調べた。具体的には、2 種が共存する固定点周りの個体数ゆらぎを記述する Langevin 方程式を導出し、定常状態における種間の情報の流れの向きを解析的に計算した。その結果、生存上の利得を表すパラメータの値がより大きい種の方が情報を失い、もう一方の種が情報を獲得するという関係が明らかになった。この関係は、競争力の高い種の方が相手に影響を与えやすいということを示唆しており、情報の取得が必ずしも生存上有利に働くとは限らないという例を示している。さらに、いわゆる情報熱力学[2]を適用することによって、競争力の低い種の方がマクスウェルの悪魔的にふるまっていることを明らかにした。

[1] T. Chotibut and D. R. Nelson Phys. Rev. Lett. 92, 022718 (2015).

[2] J. M. Parrondo, J. M. Horowitz, and T. Sagawa, Nat. Phys. 11, 131 (2015).

Inverted flag の渦誘起振動について

服部 大貴 波多野研究室 (宇宙地球科学専攻)

Inverted flag とは、固定端が下流側、自由端が上流側になるように一様流れ中に置かれた弾性体のことである。その系において旗は Euler-Bernoulli beam 方程式で、流体は Navier-Stokes 方程式で記述され、レイノルズ数 Re 、旗と流体の質量密度比 M 、無次元曲げ剛性 K の 3 つの無次元パラメータを持つ。これら 3 つのパラメータを変化させることで、Inverted flag は多様な振動パターン(相と呼ぶ)を見せる。そのうち、旗が上下に大きく振動する相を大振動領域と呼ぶ。これまでの研究で、大振動領域における一部の周期振動は渦誘起振動(VIV)で起きるということや、カオス振動が VIV の破れによって起こるといったことが示されたが、VIV の低調波性や、パラメータ空間における周期/カオス振動の詳細な分布など、未だ明らかになっていない点も多い。

そこで、本研究では格子ボルツマン法による数値計算を開発し、 $Re = 200$ 固定のもと、 M, K の二次元パラメータ空間における周期/カオス振動の詳細な分布を調べた。得られた分布に対して、推定リアプノフ指数や渦落ちの様子、FFT のピーク周波数などを参考に考察を行った結果、大振動領域における旗は、渦落ちに対して低調波で応答していることが明らかになった。それら低調波の VIV として、1 周期の間に 2 組の渦が落ちるような二倍周期の VIV(2T-VIV)と、さらに低調波の 3T-VIV を観測した。パラメータ空間上におけるそれらの分布は、渦落ちの周波数と旗の自然周波数を比べることで得られる VIV の条件式で示されるような一定の法則を持っていた。

Olami-Feder-Christensen モデルにおける自己組織化臨界現象のイベント相関

三上 周大 波多野研究室 (宇宙地球科学専攻)

自己組織化臨界現象 (self-organized criticality : SOC) とは、外部からのゆっくりとしたエネルギーの注入と急速な散逸の結果として、地震など間欠的に発生するイベントのサイズ頻度分布が自発的にべき的になる現象である[1]。この現象は、地震に限らず、神経雪崩(ニューロンの発火)や森林火災など多岐にわたる。特に、地震をはじめとする SOC 現象は、突然発生して甚大な被害をもたらすことがある。そのため、イベントのサイズや発生タイミングを予測することは重要な問題である。しかし、これまでの SOC 研究は主に頻度分布 (べき則) に焦点が当てられており、イベント間の相関については十分に研究されてこなかった。さらに、地震のマグニチュードは、従来は過去のマグニチュードに依存せず独立に決まると考えられてきたが、近年、過去のマグニチュードとの相関が示唆されている[2]。もし地震が過去の地震に依存して発生するのであれば、(原理的には) 過去の地震データをもとに次の地震を予測し、被害を軽減できる可能性がある。

本研究では、Gutenberg-Richter 則や大森則など地震の統計則をよく再現する地震の SOC モデル (Olami-Feder-Christensen モデル[3]) を用いて、SOC におけるイベント間の相関を調べた。その結果、イベントサイズやイベント発生間隔は、それぞれ過去のイベントと相関していることが明らかとなった。また、南カリフォルニアにおける地震データの解析結果についても報告する予定である。

[1] P. Bak et al., Phys. Rev. Lett. 59, 381 (1987).

[2] Q. Xiong et al., Nat Commun 14, 2056 (2023).

[3] Z. Olami et al, Phys. Rev. Lett. 68, 1244 (1992).

金属腐食のセルオートマトンモデルにおける腐食界面成長の定量的評価

宮原 健輔 波多野研究室 (宇宙地球科学専攻)

水中にある金属は周囲の環境と酸化還元反応を起こすことで腐食する。金属の外見や機能に影響を与えてしまう腐食現象は、金属を材料として利用するようになった人類にとって深刻な問題の一つであるが、自然界における腐食の発生や成長を予測することは非常に困難である。特に局部腐食と呼ばれる、金属の一部のみで腐食が進行するようなケースは、気付かぬうちに金属内部を侵食しているため、甚大な事故発生に繋がる場合もある。そのような背景から主に金属防食学の分野で、金属腐食に関する研究がなされてきた。

一方で、粒子の堆積や紙の燃焼のように、身の回りには様々なスケールでの界面成長が存在する。これらはどれも全く異なった現象のように思えるが、その成長過程には普遍的な法則があることが分かっている。金属腐食も同様に、酸化還元反応による溶液の局所的な pH の変化と溶液の拡散による pH の均一化によって多様な形状の界面へと成長する。しかしその成長過程に関する研究は十分になされていないのが現状である。

そこで本研究では、セルオートマトン法を用いた金属腐食のモデル化を通じて、酸化還元反応による局所的な pH の変化と拡散による pH の均一化の競争がもたらす界面成長のシミュレーションを試みた。その結果をもとに界面の形状に関する定量的な評価を行いながら、金属腐食の界面成長における普遍的な法則発見の可能性について検討する。

宇宙地球科学専攻

会場：D303

2月13日（木）

XRISM 衛星搭載軟 X 線撮像装置 Xtend の軌道上における 集光位置の評価と応答関数の較正

島 耕平 松本研究室 (宇宙地球科学専攻)

2023 年 9 月 7 日に打ち上げられた X 線分光撮像衛星 XRISM は、軟 X 線分光装置 Resolve を用いた高分解能分光観測と、軟 X 線撮像装置 Xtend を用いた広視野の分光撮像観測が可能な X 線天文衛星である。Xtend は X 線望遠鏡 XMA と軟 X 線撮像検出器 SXI で構成され、SXI の検出部には 4 枚の X 線 CCD が田の字状に配置されている。

XRISM に搭載された各観測装置においてそれぞれ最適な位置に天体からの X 線を集光するためには、軌道上で衛星の指向方向を調整する必要がある。そのための較正は中心軸較正と呼ばれ、初期運用の一環として行われた。我々は、特に Xtend について、撮像設定の調整、集光位置精度の検証、中心軸較正の検証の 3 つを目的とし、ここで得られた観測データをもとにして集光位置の評価を行った。

CCD のデータから入射 X 線のエネルギー情報を正しく得るためには、CCD の入射 X 線に対する応答を正確に表した応答関数が必要不可欠である。SXI の応答関数は、地上試験で得られたデータを元に構築されていた。そこで、打ち上げ後に我々は、軌道上で観測された天体のデータを用いて、地上試験で構築された応答関数が十分に正確かどうかを検証した。その結果、応答関数の再較正が必要であることが判明した。この問題を解消するため、軌道上で観測された天体のデータをもとに応答関数を較正する方法を考案し、その方法で応答関数の再較正を行った。

本発表では、Xtend の集光位置の評価と、応答関数の較正のために行ったこととその結果について述べる。

硬 X 線偏光観測気球実験 XL-Calibur 搭載望遠鏡の性能評価とフライト実験

倉本 春希 松本研究室 (宇宙地球科学専攻)

硬 X 線の偏光観測は、分光や撮像観測と独立した、高エネルギー天体の磁場構造や幾何学構造を解明できる強力な観測手法である。日米スウェーデンの国際協力で推進される XL-Calibur 気球実験は、我々が運用を担当する大有効面積の硬 X 線望遠鏡(HXT)と、小型の偏光計を組み合わせることで、過去最高の偏光検出感度を実現する。2022 年 7 月の初回フライト実験では、大西洋上空における 6.1 日間のフライト中に天体観測を試みたが、有意な信号を検出できなかった。回収された HXT の光軸を測定したところ、フライト時に光軸から 20 分角傾けて HXT を取り付けていたことが観測失敗の原因であると判明した。次に二回目のフライト実験に向けて、2023 年 4 月に大型放射光施設 SPring-8 において硬 X 線を用いた性能評価を実施し、有効面積や結像性能がフライト後も維持されていることを確認した。また同年 7 月に宇宙科学研究所(ISAS)において平行光を用いて HXT の光軸を再測定した。そして、2024 年 4 月にスウェーデンの放球施設において 10 秒角の精度で HXT を支持筐体に取り付けた。2024 年 7 月 9 日から始まった二回目のフライト実験では、5.7 日間のフライト中に Crab と Cygnus X-1 からの信号検出に成功した。その後、三回目のフライトに向けて、我々はフライト前と同様の性能測定を実施し、回収された HXT の健全性を確認した。

本発表では、初回フライト後の観測失敗要因の調査から、二回目フライト後の性能確認に至るまでの一連の過程について報告する。

GRAMS 実験に向けた液体アルゴンコンプトンカメラ原理実証機の データ取得系の開発

白濱 健太郎 松本研究室 (宇宙地球科学専攻)

Gamma-Ray and Anti-Matter Survey (GRAMS) 計画は、液体アルゴン Time-Projection Chamber (LArTPC) を検出器として用い、MeV ガンマ線帯域での分光撮像観測および暗黒物質の間接探査を目指す日米共同計画である。検出器のアルゴン原子で入射ガンマ線が散乱されると、シンチレーション光と電離電子群が生じる。LArTPC でこれらを検出し、散乱位置とガンマ線がアルゴンに落としたエネルギーを決定する。ガンマ線が複数回散乱されれば、これらの情報から、入射ガンマ線の到来方向とエネルギーがわかる。

我々は LArTPC での分光撮像を実証するため、小型原理実証機 (NanoGRAMS) を開発している。NanoGRAMS ではシンチレーション光の信号読み出しにデジタイザを用いる。一方、電子は Z 軸方向の電場でピクセル電極へとドリフトさせ、低ノイズの特定用途集積回路 VATA を用いて読み出す。ガンマ線散乱位置の Z 座標は、シンチレーション光と電子の検出時間差から計算する。この時間差を取得するため、デジタイザと VATA を同時に制御する FPGA を開発した。さらに、TPC 内部の電場、VATA の応答を再現したシミュレーションを行った。

本発表では、FPGA のロジックおよび TPC を用いた光・電子の同時検出試験の結果、試験とシミュレーションの結果の比較について報告する。

高空間分解能 X 線観測を用いた Circinus 銀河の核周円盤領域における 鉄輝線放射時間変動の発見

宮本 愛子 松本研究室 (宇宙地球科学専攻)

活動銀河核 (AGN) は銀河中心の非常に狭い領域から銀河全体の光度に匹敵する明るさで輝く天体である。その中心には超大質量ブラックホール (SMBH) が存在し、周辺の物質が質量降着することで莫大な放射が生まれると考えられている。その周辺物質は多波長観測により、核周円盤、トーラス、降着円盤、そして SMBH 近傍のコロナとして存在すると考えられているが、その物質分布や状態は未だよくわかっていない。これらの全容を解明するために有用となるのが、AGN から放射される輝線の中でも特に強い鉄の蛍光 X 線である。X 線に照射された物質は、分子・原子の状態によらず蛍光 X 線を放出するためである。さらに X 線は透過力が高いという点でも有用である。

近年、高空間分解能をもつ X 線天文衛星 Chandra の観測により、複数の近傍 AGN で数十 pc にわたる領域から鉄輝線放射が見つかった。そこで我々は、近傍 AGN の Circinus 銀河について、Chandra による約 20 年間にわたる観測データを解析し、AGN 中心から数十 pc の核周円盤領域で鉄輝線放射の分布を調べた。その結果、数年という長期間スケールでの鉄輝線放射の変動を発見した。イメージング解析で鉄輝線の明るさに変動が見られた領域についてスペクトル解析を行った結果、鉄輝線強度は 2 倍以上変動していた。これらの結果は AGN 中心部から照射される連続 X 線の強度が時間変化していることと矛盾がなく、さらに被照射体が 10 pc 未満の構造である可能性を示している。

衝撃を受けた隕石中のスティショバイトの非晶質化カイネティクス

副島 美優 近藤研究室 (宇宙地球科学専攻)

隕石中には、数万気圧以上の超高压環境下で熱力学的に安定な結晶構造の鉱物（高压鉱物）が発見されることがある。これは、天体衝突時の衝撃により瞬間的に高い温度圧力が生じるためである。このような高压力状態は天体衝突後数秒以内に解消されるが、高温状態（残留温度）は圧力解放後も数時間程度保たれる。残留温度が高い場合、生成された高压鉱物の結晶構造が崩れ、非晶質化が引き起こされる。そのため、高压鉱物の非晶質化割合は、天体衝突前後の温度圧力履歴を解明するための指標の一つとなる可能性がある。本研究では、月や火星起源の隕石中で観察されている高压鉱物であるスティショバイト (SiO_2) について、高温下で非晶質化する速度を放射光時分割 X 線回折法により測定した。実験結果より、非晶質化はショックイベント後の数時間以内の残留温度下で進行することが明らかとなった。また、Béréba 隕石中のスティショバイトの非晶質化率 (30%) から、残留温度は約 950 K と推定された。

下部マントル条件下における SiO_2 - AlOOH 固溶体形成

高橋 虎太郎 近藤研究室 (宇宙地球科学専攻)

地球の地表に存在する水成分の一部は鉱物の結晶構造中に水酸基(OH)として含まれ、含水相（水酸化物）もしくは含水化した無水鉱物として、プレートの沈み込みとともに地球内部に運ばれる。しかし、その存在量や分布、どの鉱物が水のホストであるかについては依然として議論が続いている。このため、水を含む鉱物が安定して存在できる温度・圧力条件を理解することが地球内部の水循環に関して議論する上で重要な課題である。下部マントルの高压下で熱力学的に安定な含水鉱物である δAlOOH は、沈み込むプレート内の有力な水のホスト鉱物として注目されている。また、地殻物質の主要鉱物である SiO_2 高压相も下部マントルの温度圧力条件下において、 δAlOOH とのカップリング置換 ($\text{Si}^{4+} \leftrightarrow \text{Al}^{3++\text{H}^+}$) に伴う固溶体の形成により含水化することが報告されている。

本研究では、下部マントル条件下における SiO_2 - AlOOH 系の固溶体形成の温度圧力依存性を解明することを目的として、焼結ダイヤモンドアンビルを用いたマルチアンビルプレス装置による高温高压実験を実施した。その結果、Al:Si 比が大きく異なる様々な組成の固溶体(例, $\text{Si}_{0.69}\text{Al}_{0.31}\text{O}_{2.01}\text{H}_{0.33}$, $\text{Si}_{0.38}\text{Al}_{0.62}\text{O}_{2.00}\text{H}_{0.61}$)の合成に成功し、これまで報告例のない広い SiO_2 - AlOOH 系の固溶範囲を確認した。回収物の X 線プロファイルは、 $\text{Al}^{3++\text{H}^+} \leftrightarrow \text{Si}^{4+}$ の置換が反映された直方晶系を示し、このことも固溶体の形成を裏付ける結果となった。これらの結果は、 SiO_2 - AlOOH 系の固溶体が下部マントル条件下でも安定し、水成分を運ぶホスト鉱物として地球深部の水循環において重要な役割を果たしている事を示唆した。

X線回折パターンを用いた衝撃変成度合の評価法

宮川 恵輔 近藤研究室 (宇宙地球科学専攻)

衝突現象は天体形成における素過程の一つであり、その変成度を定量的に評価することは重要である。近年、X線回折測定を用いて衝撃変成度を評価する手法が提案されているが、実際の衝撃圧力との関係はよくわかっていない。本研究では、衝撃圧力に対するX線回折パターン変化を評価する方法を検討した。X線回折測定には衝撃変成実験で回収された天然オリビン単結晶を用いた。この試料は試料中で連続的に変化する衝撃圧力が推定されており、光学的観察から圧力減衰に対応した3つの異なる変成領域が見られている。取得した2次元X線回折パターンは回折リングに沿った方向を χ 軸として展開、二値化処理した後、衝撃圧力とX線回折パターンの関係を調べた。その結果、衝撃圧力に対する χ 方向の広がりには正の相関が見られた。また、画像解析時の二値化処理時の閾値の設定と処理後の画像解析手法が課題点として挙げられた。解析結果の信頼性を上げるためt検定にも着目し、測定点を増やすことで更なる評価制度の向上が期待される。

ジャーマネートガラスの高圧力下での局所構造変化及びその実験環境構築

出口 大 佐々木研究室 (宇宙地球科学専攻)

地球形成初期では、マグマオーシャンが発達しており、現在の地球の内部構造である上部マントルと下部マントルに分化したと考えられている。マグマの構成物質である特定物質の液相一相での高圧下での構造や物性について理解することが、地球の内部構造進化やマントルダイナミクスを理解する上で重要な情報である。主要鉱物であるシリケートは転移する圧力は高く融点も高いため液相一相での実験難易度は高い。局所構造変化の研究にはXAFSにより行われるが、それらの実験を行うためには、高温高圧下での共焦点付近でのより低い温度、圧力での条件の決定を行う予備実験が必要である。そこで本研究では、予備実験のための加熱システムの開発を行い、シリケートのアナログ物質であるジャーマネートに注目し、常温での圧力依存局所構造変化の研究を行った。

予備実験環境の構築として、高温高圧下XAFS測定の諸条件の決定のための加熱システムの開発を行った。一次、二次の両方の電圧、電流、抵抗、電力の値及び、熱電対により測定される温度をモニターし、記録を行うことが可能である。また、熱電対を用いずに電力での温度推定を行うパワーモードを実装し、過去データによる理論式の自動導入及び、温度出力が可能であり、熱電対なしでの制御も可能である。さらに、PID制御による自動温度維持機能も搭載し、加熱時の自動化、およびモニターを行えるシステムの開発を行った。また、高圧下でのRb-GeO₂系ガラスを用いたその場観察でのXAFS測定実験を行い、第一配位核における原子間距離の圧力依存性について研究した。

火星周回ダストのダイナミクス： ダイモス由来ダストのフォボスへの降着の検討

中本 朝子 佐々木研究室（宇宙地球科学専攻）

火星は、フォボスとダイモスの2つの衛星があり、フォボスとダイモスから飛来したダストにより、火星を周回するダストのリングがあると Soter(1971)により、示唆された。火星を周回するダストは、フォボス軌道周りのリング状、あるいは、ダイモス軌道周りにトーラス状に分布していると考えられている。以降、様々な研究が行われてきたが、火星周りのダストリングの直接的な観測は現在まで行われていない。現在進行中の火星衛星探査 MMX では、火星の衛星フォボスからのサンプルリターンが計画されている。サンプルリターンにより、火星衛星の起源を明らかにすることが期待されている。さらに、MMX にはダスト計測器 CMDM が搭載されており、フォボス周回ダストの存在の有無が明らかになる。これにより、ダストのサイズ分布や速度、またダストの生成による天体衝突頻度などを明らかにすることができる。

MMX でのダスト検出に先立ち、フォボスのダストリングについて調べる必要がある。そこで、本研究ではフォボスのダストリングの起源に、ダイモスからの放出されたダストが成りうるかを検証する。ダストの運動について、火星とフォボスの制限三体問題に落とし込み、ダイモスから放出されたダストの軌道を調べる。ダストの運動に寄与する力は、火星とフォボスの重力、太陽放射圧を考慮した。

その結果、半径 $10\mu\text{m}$ 以上のダスト、または放出される時の初速度 640m/s 以上（ダイモスの軌道速度の3倍以上）の時、フォボスに衝突する可能性があることがわかった。これにより、MMX でのダスト計測で、ダイモス起源の粒子も捕獲される可能性がある。

月面核反応で解き明かす低エネルギー宇宙線量とその時系列変化

藤原 立貴 長峯研究室（宇宙地球科学専攻）

我々に最も近い天体である月はガンマ線帯域で輝いており、そのガンマ線は、銀河宇宙線と月表層物質との原子核相互作用から生じる。月の GeV ガンマ線は連続放射が支配的であるのに対して、月の MeV ガンマ線は連続放射とライン放射の両方を生じる。とくに MeV ガンマ線に特有のライン放射は、未開拓の MeV 銀河宇宙線について制限を与える。ここで、2020 年代後半から 2030 年代にかけて COSI や GRAMS といった次世代 MeV ガンマ線計画が開始する。これらの次世代ミッションは過去の衛星計画より 1 桁以上高い感度を達成するため、地球からの月観測が期待できる。そこで本研究では、物質中の粒子輸送過程を解く Geant4 モンテカルロツールキットを用いて、月の MeV-GeV ガンマ線スペクトルを見積もった。Geant4 では月表層物質の化学組成や宇宙線との相互作用を詳細にモデル化できるため、ライン放射の精密な予測が可能となる。我々の結果はフェルミ衛星による月の GeV ガンマ線観測と整合している。そして、月の MeV 連続放射および ^{28}Si 脱励起線・電子対消滅・ ^{26}Al 崩壊ガンマ線といったラインガンマ線が、次世代 MeV ガンマ線ミッションで探査可能であることを発見した。月の MeV ガンマ線観測は、1 GeV 以下の銀河宇宙線のフラックスや太陽地球系における活動史の解明に役立つと期待できる。

氷微惑星の集積と熱進化

佐藤 龍成 佐々木研究室 (宇宙地球科学専攻)

氷天体の素材、また地球への水や前生命物質の供給源と考えられている氷微惑星の進化の解明は、太陽系全体の進化や宇宙生命学において重要である。氷微惑星は数十°Cの低温環境にあった小惑星リュウグウのサンプルの源である一方、雪線以遠を示唆する同位体比を持ちながら高温の鉄分化を経た隕石の源でもあり、氷微惑星が経る熱的多様性を統一的に説明する進化の描像は得られていない。本研究は、岩石と水が共存することによる物性や熱輸送様式、内部構造の大きな変化が集積成長中に生じるという複雑さをモデル化し、集積成長する微惑星の最終半径、集積開始時期と期間、成長モードを様々に変え、初期温度 70 K、初期半径 1 km の氷微惑星の 1 億年間の熱進化を見直した。

その結果、内部昇温は最終半径が大きいほど高いが、集積の様式にも強く依存（集積開始が早く、短期間で集積するほど高く昇温）することが分かった。例えば CAI 形成から 1 Myr 後に集積が始まり、半径が 100 km まで線形に増加する時の内部の最高温度は、集積期間が 0.4 と 4 Myr の場合ではそれぞれ 1200 と 500 K だが、後者の半径増加が反比例的な場合では 120 K にとどまる。また最終半径が 200 km 以上の場合は Fe-FeS 共融点(1250 K) に達し得る。これらは、氷微惑星が最終半径や集積の様式の違いによって多様な進化を経ることを意味する。例えば、CAI 形成から 1 Myr 後に集積が始まり、4 Myr かけて半径 50 km まで線形成長した場合は内部昇温が低いためリュウグウ母天体に、同様に 0.4 Myr かけて半径 200 km 以上まで線形成長した場合は鉄隕石母天体に進化したと思われる。

炭素質コンドライトへの紫外線照射による宇宙風化模擬実験

江頭 勇介 佐々木研究室 (宇宙地球科学専攻)

宇宙風化作用とは、大気を持たない天体が宇宙空間に長期間さらされることでその表面の光学特性が変化する現象である。月や S 型小惑星においては、赤色化（スペクトルの傾きの増加）、暗色化（全体的な暗さ）、吸収帯の減衰などの変化が知られている。しかし、C 型小惑星における宇宙風化作用については、前述した変化とは逆の変化も確認されており、いまだ明確な結論は得られていない。また宇宙風化模擬実験は、太陽風照射を模擬したイオン照射実験と高速ダスト衝突を模擬したレーザー照射実験が主であり、紫外線照射を用いた実験はほとんど行われていない。本研究では、紫外線による C 型小惑星での宇宙風化を模擬する実験を行った。サンプルとして 2 種の炭素質コンドライト（Murchison、Aguas Zarcas）と二種の石炭サンプルを 125 μ m 以下の粉末にしたのち、加圧してペレットにしたものを用いた。これらにおよそ 1.0×10^{-3} Pa の気圧下において、紫外線

(250~400nm) を照射した。結果として可視域や近赤外域での反射スペクトルの傾きに変化が見られ、3 μ m 吸収帯の弱化が確認された。これらの変化は数ヶ月ほどの短いタイムスケールで起きており、初期での宇宙風化においては UV が強く影響することが示唆された。また、ラマン分光測定を行ったところ、照射後に蛍光が増大していることがわかった。これは結晶の格子欠陥に起因していると考えられる。UV 照射が格子欠陥を増やしたことにより、吸収帯がブロードになることで、反射スペクトルの形状に変化をもたらしていることが示唆された。

宇宙プラズマ分析器における視野掃引用軌道偏向機構の装置特性の解明

北村 悠稀 寺田研究室 (宇宙地球科学専攻)

宇宙空間におけるプラズマの挙動を理解する上で、探査衛星に搭載されたプラズマ分析器を使用した「その場観測」は重要な手段となる。その場観測においてはプラズマの3次元速度分布関数の計測が中心的な課題となるが、プラズマ分析器は2次元的な視野しか持たないため、探査衛星の自転運動を利用するか、プラズマ入射部に軌道偏向機構(Deflector)を搭載することによって3次元的な視野を確保する必要がある。Deflectorは一对の極板間に発生させた静電場を用いて荷電粒子の軌道を偏向する機構であるが、多くのDeflectorについて印加電圧値に対する掃引可能な粒子のエネルギー値に同程度の上限が存在しており、高エネルギー帯における完全な3次元視野の確保に課題がある。この課題が存在する理由の一つとして、これまでDeflector性能は数値シミュレーションやビーム照射実験を通して経験的に評価されており、定量的な評価を行うための理論の確立が不十分であることが挙げられる。

そこで本研究では、Deflectorの定量的な性能評価を目的として、近似モデルにおける粒子の運動の解析と様々な形状における数値シミュレーションとを行った。結果として数値シミュレーション結果をよく再現するモデルの構築に成功し、粒子が静電ポテンシャルとのエネルギー交換を通して偏向していることが性能上限を与える主要な要因であることを解明した。

NWA6991(CV3)隕石に含まれる層構造コンドラールの局所酸素同位体分析から探る CV コンドライト母天体の集積史

炭谷 拓真 寺田研究室 (宇宙地球科学専攻)

隕石の全岩組成に見られる同位体二分性から、非炭素質 (NC) 物質が円盤内側で、炭素質 (CC) 物質が円盤外側で形成され、それらの輸送や混合が制限されていたと考えられている。しかし、近年の高空間分解能同位体分析により、円盤内外での物質混合が不完全であった可能性が示唆されている。このような混合や物質進化の物理化学プロセスを解明することは、初期太陽系における天体形成の理解に不可欠である。本研究では、炭素質コンドライト NWA 6991 (CV3) 隕石に含まれる多様な岩石学的特徴を持つコンドラールを対象に、局所酸素同位体分析を行った。FeO に富むコンドラールおよびダスティカンラン石を含むコンドラールでは、カンラン石と輝石の $\Delta^{17}\text{O} (= \delta^{17}\text{O} - 0.52 \times \delta^{18}\text{O}; \text{‰})$ 値が -0.52‰ から $+0.37\text{‰}$ の範囲を示し、NC 隕石のコンドラールに特徴的な組成と一致した。ダスティカンラン石を含むコンドラールの Ch63 では、外縁部のカンラン石が NC 的な組成、内部のダスティカンラン石が CC 的な組成を示した。これは円盤の内側由来の物質が外側まで輸送され、部分熔融と ^{16}O に富むガスとの同位体交換を経て形成されたことを示唆する。さらに、層構造コンドラールでは、コアとリムが均質な CC 的組成 ($-6.8\text{‰} < \Delta^{17}\text{O} < -5.9\text{‰}$) を持つことが明らかになった。先行研究と比較すると、層構造や格子状カンラン石を含むコンドラールは、NC 的前駆物質が CC 領域で熔融し、 ^{16}O に富む H_2O ガスとの同位体交換を経験して形成されたことが示唆される。本研究の結果から、CV コンドラール形成時の円盤ガスの $\Delta^{17}\text{O}$ 値は -20‰ から -3‰ であると推定され、CV コンドライトの母天体がスノーライン近傍で集積し、円盤の多様な領域から供給された物質を取り込んでいたことが示唆される。

判定会議について

判定会議

日時：2月13日（木）16：00～

会場：H701

※教授、准教授、講師および副査担当の助教の方は全員出席です。

2025年度 修士論文発表会 予稿集

発行：2025年2月7日

編集：修士論文発表会世話人

物理学専攻 松野研究室

稲村健臣

神田洸太

高藤大悟

宇宙地球科学専攻 近藤研究室

菅田竜太

中村虎太郎

松井亮介