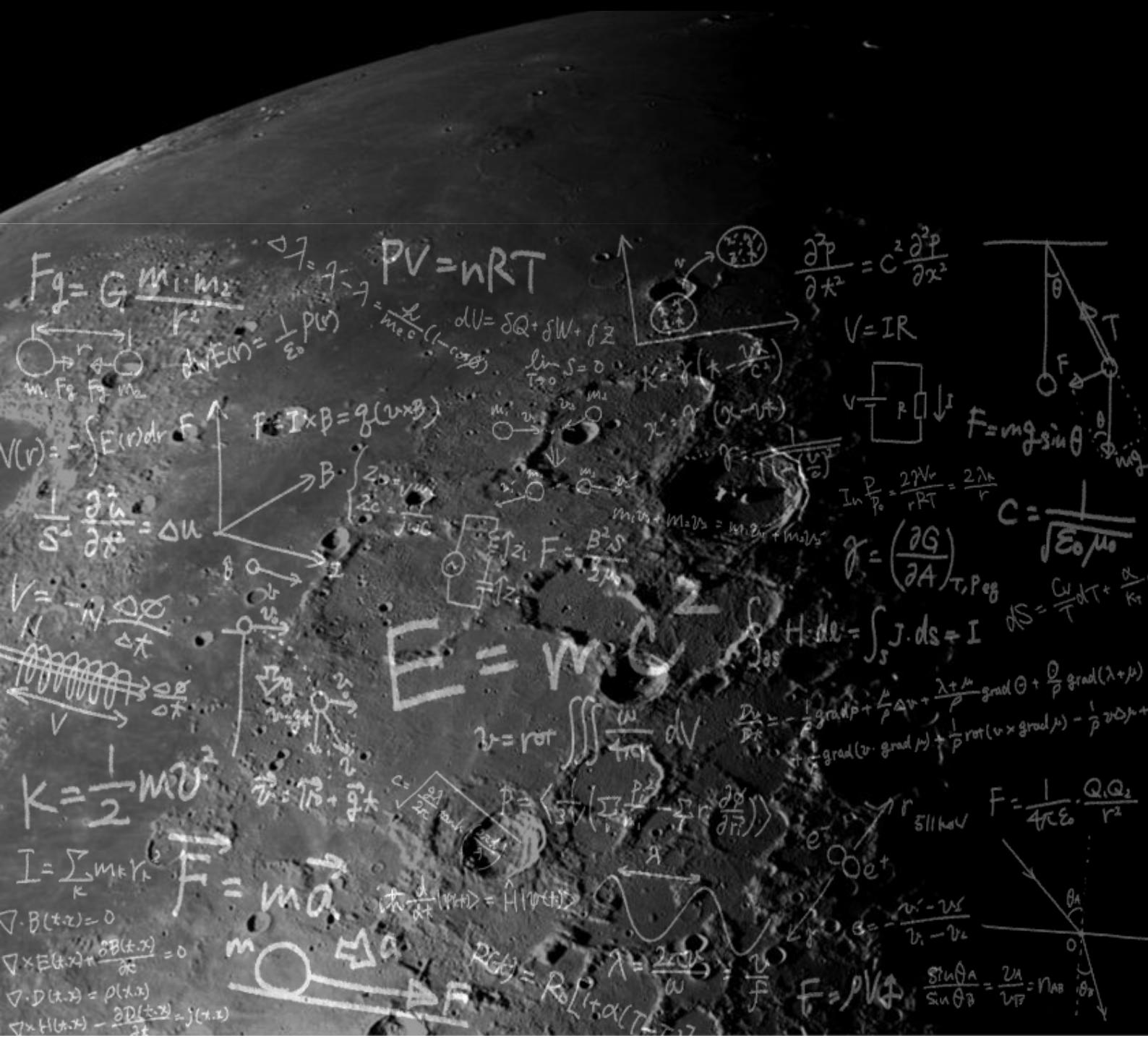


# 2025 年度 大阪大学大学院理学研究科 物理学専攻・宇宙地球科学専攻 修士論文発表会

2026 年 2 月 12 日 (木) • 13 日 (金)



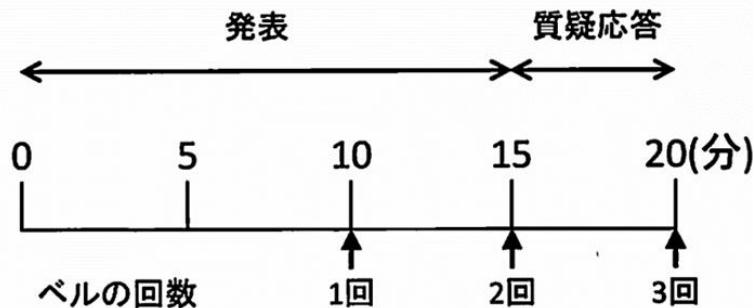
# 【目次】

● 物理学専攻の発表について-----	3
● 宇宙地球科学専攻の発表について-----	5
● タイムテーブル	
・物理学専攻 素粒子・原子核グループ-----	7
・物理学専攻 物性グループ-----	8
・宇宙地球科学専攻-----	9
● 予稿	
・物理学専攻 素粒子・原子核グループ 12 日-----	10
・物理学専攻 素粒子・原子核グループ 13 日-----	23
・物理学専攻 物性グループ 12 日-----	31
・物理学専攻 物性グループ 13 日-----	45
・宇宙地球科学専攻-----	54

# 【物理学専攻の発表について】

- 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

日時：2月 13 日（金）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（木）、13日（金）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（木）の最後のタイムキーパーの方へ  
12日（木）の発表会終了後、13日（金）の最初のタイムキーパーの方に
  - コールベル
  - レーザーpointer
  - 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（金）の最後のタイムキーパーの方へ  
13日（金）の発表会終了後、
  - コールベル
  - レーザーpointer
  - 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。

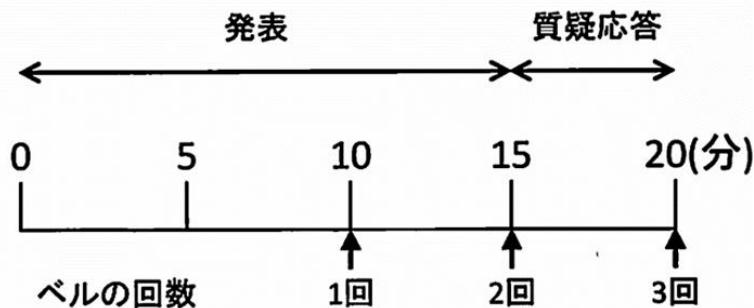
## 【緊急連絡先】

- 物理学専攻事務室（H408）：  
續木佐知子（TEL：06-6850-5377, Ext：5377）
- 物理学専攻素粒子論研（）：  
村田 洋彬、後藤広樹、三木 幸大  
(TEL：06-6850-5761, Ext：5761)

# 【宇宙地球科学専攻の発表について】

## 発表時間

発表時間は 15 分、質疑応答が 5 分の合計 20 分です。



## 発表の進め方

- 発表会では ZOOM を使用します。発表スライドを保存している PC を各自持参してください。
- 発表者は ZOOM でスライドを共有して発表してください。その日の最初の発表者は開始時刻までに準備を終えておいてください。
- 次の発表者は指定の席に座り ZOOM に接続して、前の発表者の発表が終わり次第すぐにスライド共有して発表を始められるように準備をしてください。
- 座長の方は発表者が準備でき次第発表を始めさせてください。また、発表が 20 分を超えた場合は強制的に終了させてください。
- タイムキーパーは発表者が話し始めたたらタイマーをスタートさせてください。ベルを鳴らすタイミングと回数は上図の通りです。
- 休憩時間は時間調整の役割も担っています。各セッションの開始時刻になりましたらすぐに発表を始められるように、座長の方、発表者、タイムキーパーは準備をお願いします。
- もし発表会の途中で何かしら問題が起きた場合は、会場にいる世話人に伝えただくか、緊急連絡先に連絡をお願いします。

## 判定会議

日時：2月13日（金）16:00～

会場：H701

※教授、准教授、講師及び副査担当の助教の方は必ずご出席願います。

## タイムキーパーの方へ

- 2月12日（木）の最初のタイムキーパーの方へ

10日（火）にタイムキーパーセットを受け取り、当日の朝に開始時刻までに準備を終えておいてください。

- 2月12日（木）の最後のタイムキーパーの方へ

12日（木）の発表会終了後、13日（金）の最初のタイムキーパーの方にセットを手渡してください。

- 2月13日（金）の最初のタイムキーパーの方へ

前日にセットを受け取り、当日の朝に開始時刻までに準備を終えてください。

- 2月13日（金）の最後のタイムキーパーの方へ

13日（木）の発表会終了後、セットを物理学専攻事務室（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）

- 宇宙地球科学専攻 桂木研（F121）：

岩崎光希、佐野仁哉、岑野佑真、佐伯翼、成田隼人  
(TEL：06-6850-5557, Ext：5557)

# 【タイムテーブル】

## 素粒子・原子核グループ（会場: H701）

### 1日目(2/12)

	座長	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
9:00-9:20	民井 淳	田村 竜一	兼村 晋哉	11	○	兼村 晋哉	大野木 哲也	佐藤 亮介			(兼村研)
9:20-9:40		益田 竜馬	兼村 晋哉	11		兼村 晋哉	佐藤 亮介	田中 実			村田 洋彬
9:40-10:00		宮 福太朗	兼村 晋哉	12	○	兼村 晋哉	西岡 辰磨	佐藤 亮介			
休憩(10分)											
10:10-10:30	依田 哲彦	齋藤 駆	大野木 哲也	12	○	大野木 哲也	西岡 辰磨	山口 哲			(大野木研)
10:30-10:50		所 順也	大野木 哲也	13	○	大野木 哲也	兼村 晋哉	深谷 英則			後藤 広樹
10:50-11:10		山口 雄大	大野木 哲也	13	○	大野木 哲也	兼村 晋哉	深谷 英則			
休憩(10分)											
11:20-11:40	板橋 健太	蓬郷 修一朗	西岡 辰磨	14		西岡 辰磨	大野木 哲也	山口 哲			(西岡研)
11:40-12:00		中山 陽貴	西岡 辰磨	14	○	西岡 辰磨	兼村 晋哉	山口 哲			三木 幸大
12:00-12:20		前部屋 敦	西岡 辰磨	15	○	西岡 辰磨	大野木 哲也	山口 哲			
12:20-12:40		吉城 謙平	西岡 辰磨	15	○	西岡 辰磨	大野木 哲也	後藤 郁夏人			
休憩(60分)											
13:40-14:00	兼村 晋哉	明松 凜也	藤岡 慎介	16		藤岡 慎介	板橋 健太	Morace Alessio			(藤岡研)
14:00-14:20		大村 リョウ	藤岡 慎介	16		藤岡 慎介	民井 淳	Morace Alessio			木村 魁
14:20-14:40		板倉 菜美	依田 哲彦	17		松田 洋平	民井 淳	依田 哲彦			
休憩(30分)											
15:10-15:30	山口 哲	東 昌徳	石川 貴嗣	17	○	石川 貴嗣	野海博之	板橋 健太			(浅川研)
15:30-15:50		YAN BING	石川 貴嗣	18		石川 貴嗣	青木正治	野海 博之	郡英輝		大和 寛尚
15:50-16:10		吉村 源樹	浅川 正之	18	○	浅川 正之	兵藤 哲雄	赤松 幸尚	広野 雄士(筑波大)		
16:10-16:30		坂下 陽亮	浅川 正之	19		浅川 正之	湯川 諭(宇宙)	赤松 幸尚			
休憩(10分)											
16:40-17:00	石川 貴嗣	JIANG XINYI	石井 理修	19	○	兵藤 哲雄	大野木哲也	石井 理修			(RCNP核物理理論研究部門)
17:00-17:20		吉川 侑輝	嶋 達志	20		嶋 達志	民井 淳	三島 賢二			中澤 光
17:20-17:40		内藤 圭祐	細貝 知直	20	○	細貝 知直	川畠 貴裕	金 展	顧 彦君 (Gu Yanjun)		
休憩(10分)											
17:50-18:10	浅川 正之	上田 隼也	青木 正治	21	○	青木 正治	上野 一樹	南條 創			(青木研)
18:10-18:30		住村 明紀	青木 正治	21		上野 一樹	青木 正治	増渕 達也			宮井 陽生
18:30-18:50		高見 翔太	青木 正治	22	○	青木 正治	上野 一樹	石川 貴嗣	福田 光宏		

### 2日目(2/13)

	座長	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
9:20-9:40	後藤 郁夏人	笹川 陽平	民井 淳	24		民井 淳	大田 晋輔	吉田 賢市			(RCNP核物理実験研究部門)
9:40-10:00		柴北 洋明	民井 淳	24		民井 淳	大田 晋輔	小林 信之			横田 佳祐
休憩(10分)											
10:10-10:30	藤岡 慎介	岡村 拓実	川畠 貴裕	25	○	川畠 貴裕	板橋 健太	阪上 朱音			(川畠研)
10:30-10:50		下條 暖人	川畠 貴裕	25	○	川畠 貴裕	民井 淳	小田原 厚子			田中 玲奈
10:50-11:10		前里 妄太朗	川畠 貴裕	26	○	川畠 貴裕	大田 晋輔	小林 信之			
11:10-11:30		松田 基弥	小田原 厚子	26	○	川畠 貴裕	大田 晋輔	小田原厚子			
休憩(60分)											
12:30-12:50	佐藤 亮介	谷川 秀憲	吉田 斎	27		吉田 斎	川畠 貴裕	嶋 達志			(越野研)
12:50-13:10		野田 健太	吉田 斎	27	○	板橋 健太	川畠 貴裕	吉田 斎			南川 真輝
13:10-13:30		安田 圭吾	福田 光順	28		福田 光順	川畠 貴裕	三原 元嗣			
13:30-13:50		宮川 泰地	大田 晋輔	28	○	大田 晋輔	川畠 貴裕	兵藤 哲雄	田中 純貴		
休憩(10分)											
14:00-14:20	兵藤 哲雄	小川 大樹	南條 創	29	○	南條 創	増渕 達也	大田 晋輔			(南條研)
14:20-14:40		北野 至	南條 創	29		南條 創	増渕 達也	上野 一樹			寺田 真都
14:40-15:00		本間 芽糸	南條 創	30	○	南條 創	増渕 達也	青木 正治			

16:00-18:00頃

判定会議 (H701)

## 物性グループ（会場: D407）

### 1日目(2/12)

	座長	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
9:00-9:20	豊田 岐聰	小寺 智也	萩原 政幸	32		萩原 政幸	花咲 徳亮	鳴海 康雄	木田 孝則		(浅野研)
9:20-9:40		小山 宗晃	萩原 政幸	32		萩原 政幸	塩貝 純一	鳴海 康雄	木田 孝則		永田怜
9:40-10:00		坂本 裕太	萩原 政幸	33		萩原 政幸	松野 丈夫	鳴海 康雄	木田 孝則		
10:00-10:20		大谷 洋葵	鳴海 康雄	33		鳴海 康雄	萩原 政幸	工藤 一貴			
休憩(10分)											
10:30-10:50	浅野 建一	生島 匠	工藤 一貴	34		工藤 一貴	新見 康洋	鳴海 康雄			(工藤研)
10:50-11:10		上本 龍太郎	工藤 一貴	34		工藤 一貴	塩貝 純一	鳴海 康雄			小玉隆太
11:10-11:30		田邊 俊樹	工藤 一貴	35		工藤 一貴	黒木 和彦	塩貝 純一			
11:30-11:50		中島 海斗	工藤 一貴	35		工藤 一貴	越智 正之	苅 男			
11:50-12:10		野村 健人	工藤 一貴	36		工藤 一貴	新見 康洋	竹森 那由多			
12:10-12:30		平岡 良登	工藤 一貴	36		工藤 一貴	萩原 政幸	苅 男			
休憩(60分)											
13:30-13:50	萩原 政幸	佐藤 穂有	大岩 頸	37	○	大岩 頸	木村 真一	藤田 高史			(大岩研)
13:50-14:10		中川 元	藤田 高史	37	○	大岩 頸	新見 康洋	藤田 高史			藤田 翔伍
14:10-14:30		小林 歩夢	大岩 頸	38	○	大岩 頸	花咲 徳亮	松野 丈夫	高田 真太郎	藤田 高史	
14:30-14:50		齊木 ゆきの	浅野 建一	38		浅野 建一	黒木 和彦	竹森 那由多			
14:50-15:10		橋詰 宗一郎	浅野 建一	39	○	浅野 建一	越野 幹人	越智 正之			
休憩(10分)											
15:20-15:40	花咲 徳亮	小野 由喜	新見 康洋	39		新見 康洋	近藤 浩太（先導）	高田 真太郎			(新見研)
15:40-16:00		岸木 克将	新見 康洋	40		新見 康洋	越智 正之	苅 男			中村 敏貴
16:00-16:20		田端 佑伍	新見 康洋	40		新見 康洋	黒木 和彦	高田 真太郎			
16:20-16:40		二階堂 夏海	新見 康洋	41		新見 康洋	波多野 恭弘（宇宙）	苅 男			
16:40-17:00		山田 和輝	新見 康洋	41	○	新見 康洋	松野 丈夫	高田 真太郎			
休憩(10分)											
17:10-17:30	工藤 一貴	深見 海斗	吉野 元	42		吉野 元	川崎 猛史	波多野 恭弘（宇宙）			(吉野研)
17:30-17:50		阿部 翔太郎	川崎 猛史	42	○	吉野 元	波多野 恭弘（宇宙）	桂木 洋光（宇宙）	江端 宏之（宇宙）	川崎 猛史	寺尾 佳吾
17:50-18:10		内田 丈翔	越野 幹人	43	○	越野 幹人	松野 丈夫	黒木 和彦			
18:10-18:30		奥村 凉介	越野 幹人	43		越野 幹人	花咲 徳亮	浅野 建一			
18:30-18:50		吉田 大輝	越野 幹人	44		越野 幹人	萩原 政幸	越智 正之			

### 2日目(2/13)

	座長	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
9:00-9:20	木村 真一	稻村 健臣	松野 丈夫	46	○	松野 丈夫	工藤 一貴	塩貝 純一			(松野研)
9:20-9:40		越智 薫	松野 丈夫	46		松野 丈夫	近藤 浩太（先導）	上田 浩平			葛堀 和也
9:40-10:00		神田 洋太	松野 丈夫	47		松野 丈夫	越智 正之	塩貝 純一			
10:00-10:20		高藤 大悟	松野 丈夫	47	○	松野 丈夫	新見 康洋	上田 浩平			
10:20-10:40		田中 智邁	松野 丈夫	48		松野 丈夫	黒木 和彦	塩貝 純一			
10:40-11:00		吉田 航	松野 丈夫	48		松野 丈夫	花咲 徳亮	塩貝 純一			
休憩(10分)											
11:10-11:30	松野 丈夫	市川 龍	木村 真一	49		木村 真一	新見 康洋	中村 拓人			(木村研)
11:30-11:50		諏訪 宏直	木村 真一	49		木村 真一	鳴海 康雄	鈴木 剛			高橋 流ノ介
11:50-12:10		PAN YUE	木村 真一	50		木村 真一	花咲 徳亮	鈴木 剛			
12:10-12:30		山口 紘佳	木村 真一	50		木村 真一	工藤 一貴	中村 拓人			
休憩(60分)											
13:30-13:50	新見 康洋	工藤 大輝	黒木 和彦	51		越智 正之	松野 丈夫				(花咲研)
13:50-14:10		山田 雄士	黒木 和彦	51		越智 正之	越野 幹人				戸崎 洋輔
14:10-14:30		橘 凜人	豊田 岐聰	52		豊田 岐聰	萩原 政幸	大塚 洋一			
14:30-14:50		田中 健護	花咲 徳亮	52		花咲 徳亮	萩原 政幸	村川 寛	酒井 英明（東北大）		
14:50-15:10		山下 淳志	花咲 徳亮	53		花咲 徳亮	松野 丈夫	村川 寛	酒井 英明（東北大）		

16:00-18:00頃

判定会議 (H701)

## 宇宙地球科学専攻（会場：D307）

### 1日目 (2/12) 開場08:30

時間	座長	発表者	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
09:00-09:20	住 貴宏	鵜木 伸伍	波多野 恒弘	55	波多野 恒弘	湯川 諭	江端 宏之				加納 舞 (波多野研)
09:20-09:40		大久保 智規	波多野 恒弘	55	○ 波多野 恒弘	湯川 諭	吉野 元 (物理)				
09:40-10:00		加藤 陸	波多野 恒弘	56	○ 波多野 恒弘	松尾 太郎	田之上 智宏				
10:00-10:20		福島 大樹	波多野 恒弘	56	湯川 諭	波多野 恒弘	桂木 洋光				
10:20-10:40		QIN MENGYAO	波多野 恒弘	57	波多野 恒弘	湯川 諭	吉野 元 (物理)				

休憩 (30分)

11:10-11:30	波多野 恒弘	出射 旭	住 貴宏	57	住 貴宏	鈴木 大介	松尾 太郎				小川 涼 (住研)
11:30-11:50	奥本 祐生	住 貴宏		58	住 貴宏	鈴木 大介	小高 裕和				
11:50-12:10	長野 冬瑚	住 貴宏		58	住 貴宏	増田 賢人	木村 淳				
12:10-12:30	西尾 茉優	住 貴宏		59	住 貴宏	増田 賢人	井上 芳幸				

休憩 (90分)

14:00-14:20	寺田 健太郎	佐藤 風紀	桂木 洋光	59	桂木 洋光	江端 宏之	近藤 忠				岩崎 光希 (桂木研)
14:20-14:40		田吹 修人	桂木 洋光	60	桂木 洋光	江端 宏之	湯川 諭				

休憩 (10分)

14:50-15:10	桂木 洋光	川上 稜平	松尾 太郎	60	○ 松尾 太郎	近藤 忠	木村 淳				坂元 貴之 (松尾研)
15:10-15:30		新井 千紘	松尾 太郎	61			住 貴宏	寺田 健太郎	木村 淳		

休憩 (10分)

15:40-16:00	松尾 太郎	中村 虎太郎	近藤 忠	61	西 真之	近藤 忠	土屋 旬				仲里 瑞一 (近藤研)
16:00-16:20		北原 大地	近藤 忠	62	近藤 忠	大高 理	増田 賢人				
16:20-16:40		松井 亮介	近藤 忠	62	近藤 忠	西 真之	土屋 旬				

### 2日目 (2/13) 開場08:30

氏名	指導教員名	ページ	進学	主査	副査	副査	副査	副査	副査	タイムキーパー
09:00-09:20	長峯 健太郎	冀 隆太朗	松本 浩典	63	小高 裕和	松本 浩典	川畠 貴裕 (物理)			高塚 紗弥菜 (松本研)
09:20-09:40		豊田 祐生	松本 浩典	63	坂和 洋一	松本 浩典	横田 勝一郎			
09:40-10:00		河村 穂登	松本 浩典	64	松本 浩典	川室 太希	増田 賢人			
10:00-10:20		村上 海都	松本 浩典	64	松本 浩典	川室 太希	井上 芳幸			

休憩 (20分)

10:40-11:00	近藤 忠	草壁 克典	長峯 健太郎	65	井上 芳幸	長峯 健太郎	増田 賢人				桑山 裕斗 (長峯研)
11:00-11:20		小林 莉久	長峯 健太郎	65	井上 芳幸	長峯 健太郎	小高 裕和				
11:20-11:40		西濱 大将	長峯 健太郎	66	○ 長峯 健太郎	松本 浩典	井上 芳幸				
11:40-12:00		Shiyuan Wang	長峯 健太郎	66	○ 長峯 健太郎	松本 浩典	井上 芳幸	小高 裕和	増田 賢人		

休憩 (60分)

13:00-13:20	松本 浩典	上原 佑斗	寺田 健太郎	67	○ 寺田 健太郎	桂木 洋光	横田 勝一郎				佐藤 慧 (寺田研)
13:20-13:40		花卉 朔	寺田 健太郎	67	寺田 健太郎	桂木 洋光	福田 航平				
13:40-14:00		篠崎 裕夢	寺田 健太郎	68	○ 寺田 健太郎	松尾 太郎	横田 勝一郎				福田 航平
14:00-14:20		藤田 盛之介	寺田 健太郎	68	寺田 健太郎	西 真之	福田 航平				
14:20-14:40	土屋 旬	満田 龍一	寺田 健太郎	69	山中 千博	坂和 洋一	寺田 健太郎				
14:40-15:00		武田 晋弥	寺田 健太郎	69	山中 千博	寺田 健太郎	桂木 洋光				
15:00-15:20		松本 匡能	寺田 健太郎	70	○ 寺田 健太郎	桂木 洋光	松尾 太郎	山中 千博	横田 勝一郎		

16:00-18:00頃

判定会議 (H701)

**物理学専攻**  
**素粒子・原子核グループ**  
**会場：H701**  
**2月12日（木）**

## エキゾチックな拡張 Higgs 模型における 摂動ユニタリティ制限と真空安定性

田村竜一 素粒子論研究室(物理学専攻)

素粒子標準模型は今までに得られている実験結果の多くを非常によく説明できる優れた模型である。さらに 2012 年の LHC による Higgs 粒子の実験的な観測によって標準模型の確かさがより堅固なものとなった。しかし暗黒物質やニュートリノ質量問題、バリオン数非対称性などといった標準模型でとらえきれない現象が確認されている。このような現象に説明を与える、標準模型を超えた新たな理論模型を構築することは現在の素粒子物理学の最も重要なテーマの一つである。

新物理の余地が残されている Higgs 機構を拡張することで種々の現象を説明する模型に関する研究は盛んであり、とりわけ電弱  $\rho$  パラメータがツリーレベルで 1 に保たれる模型については多くの知見が蓄えられつつある。一方でツリーレベルでの電弱  $\rho$  パラメータが一般に 1 からずれるような拡張模型の中にも、Type-II シーソー機構によってニュートリノの微小質量を説明できる Higgs triplet model のように豊富な物理を含む模型が存在する。

本研究では、標準理論の Higgs 場に四重項を加えたエキゾチックな模型を題材とした。この模型は Higgs ポテンシャルに CP の破れを含み得る。そのためバリオン数非対称性などの問題に関して興味深い。模型の Higgs ポтенシャルの包括的な解析を行うとともに理論からの制約として摂動ユニタリ制限および真空安定性について議論し、この模型のパラメータが許容される領域を研究する。

## Nelson-Barr 模型における anomaly-free axion-like particle

益田 竜馬 素粒子論研究室 (物理学専攻)

素粒子標準模型は、様々な実験結果を高精度で再現しているが、CP 対称性に関しては未解決の問題を残している。QCD のラグランジアンには CP 対称性を破るトポロジカルな  $\theta$  項が許される。しかしながら、中性子電気双極子モーメントの実験による厳しい制限から、 $\theta$  項由来の CP の破れは CKM 行列による CP の破れの大きさに比べて著しく小さいことが分かっている。この階層性は強い CP 問題として知られている。本研究では、強い CP 問題を CP 対称性の自発的破れによって解決する Nelson-Barr 模型について議論する。特に、この模型に導入する  $Z_N$  対称性によって、軽い擬スカラー場である axion-like particle (ALP) が現れるなどを指摘する。さらに、本研究では ALP と標準模型のクォークの相互作用について低エネルギー有効理論を用いて議論し、暗黒物質の残存量を説明できるパラメータ領域を探索する。

## **'t Hooft-Polyakov monopole による電弱 monopole の UV completion**

宮 福太朗 素粒子論研究室 (物理学専攻)

トポロジカルソリトンは、真空の位相構造に起因して現れる非摂動的な場の配位であり、その代表例の一つが magnetic monopole である。とくに't Hooft-Polyakov monopole は、非自明な 2 次のホモトピー群によりトポロジカルに安定な解として知られているが、素粒子の標準模型内には存在しない。一方で Cho と Maison は、標準模型の電弱セクターにおいて Dirac monopole と同じゲージ場の配位を持つ monopole 解が存在することを示した。しかし、この Cho-Maison monopole (電弱 monopole) は、空間原点でエネルギーが発散してしまうという問題点を抱えている。この事実は、標準模型が高エネルギー領域における Cho-Maison monopole の振る舞いを十分に記述できていないことを示唆している。

その背景の下で本研究では、標準模型を低エネルギーで再現する高エネルギー理論として Pati-Salam 模型を採用し't Hooft-Polyakov monopole が低エネルギー有効理論において Cho-Maison monopole として現れるシナリオを解析した。その結果、高エネルギー理論においてトポロジカルに安定な't Hooft-Polyakov monopole の存在が、低エネルギー有効理論における Cho-Maison monopole のトポロジカルな安定性として解釈できる。

## **$Z_N$ 対称性のゲージ化とパラフェルミオンについて**

齋藤駆 素粒子論研究室 (物理学専攻)

パラフェルミオンは、マヨラナフェルミオンに代わるトポロジカル量子計算の媒体として近年期待されている準粒子である。理論的には、トポロジカル絶縁体や分数量子ホール系の境界において実現することが予想されていて、物性物理学的な観点から強く動機付けられている。一方で、場の理論におけるその性質には、例えばパラスピン構造など、未解明な点も多い。またパラフェルミオンは、フェルミオンが持つ  $Z_2$  対称性を  $Z_N$  対称性へと拡張したものと捉えることができる。したがって特に、Symmetry TFT やトポロジカル欠陥、インターフェースといった、場の理論において近年発展の著しい対称性の記述手法を使ってパラフェルミオンの性質を調べることは基礎研究の立場からとても重要である。

そこで本修士論文では、2 次元時空における  $Z_{N \geq 2}$  対称性に付随する理論間の対応関係（オービフォールド、ボソン化、および（パラ）フェルミオン化）について、具体例となる共形場理論の対応に触れながらレビューする。

## Bs→Klv セミレプトニック崩壊の格子 QCD を用いた解析

所 順也 素粒子論研究室(物理学専攻)

素粒子標準模型は、現代の素粒子物理学において最も実験と整合した理論である。例えば、量子電磁力学における高次ループ計算によって得られる電子の異常磁気モーメントは実験値と極めて高い精度で一致しており、結合定数が小さい理論においては摂動論的な計算が有効であることを示している。一方で、強い相互作用を記述する量子色力学はハドロンスケールにおいて強結合となり、摂動論的な計算手法が使えず、非摂動的な計算手法が必要となる。量子色力学を用いたハドロン物理の第一原理的な計算として、格子 QCD を用いた数値計算法が確立されている。量子色力学を用いたハドロン物理の第一原理的な計算として、格子 QCD を用いた数値計算法が確立されている。

本論文ではメビウスドメインウォールフェルミオンを用いた格子 QCD により、メソンのセミレプトニック崩壊過程  $Bs \rightarrow Klv$  の解析を行うことを目的とする。富岳を用いたハイブリッドモンテカルロ法による格子シミュレーションからゲージ配位を生成し、相関関数を解析することで本過程のハドロンに関する形状因子を計算する。さらに、得られた形状因子と実験によるデータを組み合わせることで CKM 行列要素  $|Vub|$  の精密決定を目指す。

現在、 $|Vub|$ について  $B \rightarrow \pi lv$  などのセミレプトニック崩壊を用いたエクスクルーシブな手法による値と、光学定理や重クォーク展開を用いたインクルーシブな手法による値の間には  $2\sigma$  程度の差が報告されており、この差の起源が計算上の系統誤差なのか新物理の兆候なのかは現在も未解決である。メビウスドメインウォールフェルミオンを用いることで離散化誤差が小さく、カイラル摂動論による結果をカイラル外挿に用いることができるという利点があり、より精密な検証に寄与することが期待される。

## メビウスドメインウォールフェルミオンを用いた有限温度 QCD におけるメソン 2 点相関関数の対称性の解析

山口 雄大 素粒子論研究室 (物理学専攻)

有限温度 QCD におけるメソン 2 点相関関数は、有限温度における理論の対称性を調べるための基本的な観測量である。高温領域における相関関数の漸近的振る舞いについては、摂動論的解析が可能であり、Laine と Vepsäläinen により、空間相関関数の遮蔽質量が高温極限で  $2\pi T$  に漸近することが示されている。一方、David は、メビウスドメインウォールフェルミオンを用いた 2 フレーバー格子 QCD シミュレーションにより、臨界温度近傍から高温領域にかけて、 $SU(2)_L \times SU(2)_R$  カイラル対称性、軸性  $U(1)_A$  対称性、および高温領域でスピン自由度を入れ替える Emergent 対称性に対応する相関関数の縮退構造を数値的に解析した。

これらの先行研究を受け本研究では、ストレンジクォークを含む有限温度 2+1 フレーバー QCD においてメソン 2 点相関関数の数値解析を行った。その結果、 $SU(2)_L \times SU(2)_R$  カイラル対称性および高温領域で議論されている Emergent 対称性については、先行研究と同様の回復が確認された。軸性  $U(1)_A$  対称性についても有効的な回復が確認されたが、擬臨界温度近傍における  $U(1)_A$  アノマリーの抑制は、先行研究の 2 フレーバー解析と比べて限定的であった。

## トポロジカル絶縁体から見たフェルミオンのアノマリー

蓬郷修一朗 素粒子論研究室（物理学専攻）

場の量子論において、古典的な対称性が量子化により破れるアノマリーは、理論の非摂動的な性質の研究にも役立つなど強力なツールとして知られている。近年、この概念は物性物理学にも波及し、対称性で保護されたトポロジカル相（SPT 相）と、その境界におけるアノマリーとの間には密接な関係があることが理解されるようになった。本修士論文では、3 次元トポロジカル絶縁体を具体例に、この対応関係を検証した。特に、Atiyah-Patodi-Singer の指標定理を用いることで、境界フェルミオンが持つアノマリーが、バルクからの寄与（アノマリー・インフロー）によって正確に相殺され、全体系として整合性が保たれる機構を検討した。

## 欠損を持つ共形場理論の重力双対の解析

中山 陽貴 素粒子論研究室(物理学専攻)

共形場理論 (CFT) は、場の量子論の非摂動的側面の理解において中心的な役割を果たすと同時に、物質の臨界現象を記述する枠組みとしても重要である。現実の物質系には、境界や界面、不純物などの欠損 (defect) が普遍的に存在し、そのような系での臨界現象を記述する理論として、欠損入り共形場理論 (Defect CFT, DCFT) が発展してきた。

一方、ホログラフィーの具体例である AdS/CFT 対応は、反ド・ジッター (AdS) 空間上の量子重力理論と、その境界上に定義される一次元低い CFT との等価性を主張するものであり、量子重力理論の定式化や CFT の非摂動的な解析に多大な進展をもたらしてきた。この対応の自然な拡張として、defect を含む CFT と重力理論を結びつける AdS/DCFT 対応が提唱されている。その中には、余次元 1 の defect である境界 (boundary) を持つ共形場理論 (Boundary CFT, BCFT) の重力双対を記述する AdS/BCFT モデルが含まれる。

しかし、これまでに知られている AdS/DCFT 対応の具体的モデルは、特定の次元の defect や超対称性を持つ CFT に限定されている。そこで、本研究では余次元が 2 以上の defect を持つ DCFT に対する重力双対を構成する。具体的には、defect を余次元 1 の超曲面上に課された境界条件として捉えることで、AdS/BCFT モデルの構成方法を応用する。さらに、構築したモデルを用いて、defect entropy, defect free energy, 相関関数といった DCFT において重要な物理量をホログラフィックに計算し、既知の DCFT の結果と整合的であることを示す。

## 超共形対称性を保つ Boundary condition の分類

前部屋 敦 素粒子論研究室(物理学専攻)

近年、超共形対称性を有する場の理論は、AdS/CFT対応の文脈において広く注目を集めている。AdS/CFT対応とは、反ド・ジッター (AdS) 時空上の重力理論と、その境界に定義される共形場理論との間に成立する双対性であり、これを具体的な模型として記述する際に超共形対称性は極めて重要な役割を果たす。また、AdS/CFT対応にはさまざまな拡張が存在し、その一例として、CFT側にboundaryを導入するAdS/BCFT対応が挙げられる。

一方、このようなboundaryを含む系を考察する場合、どのようなboundary conditionを課すかが本質的な問題となる。特に対称性の保存は、boundary conditionの選択に強く依存する。逆に言うと境界を含む理論において対称性を保持するためには、許されるboundary conditionに一定の制約が課される。

本研究では文献[1]に従い、超共形対称性を有する理論を対象として、対称性を保存する boundary conditionとしてどのようなものが許されるかを、現在知られている範囲内で分類を行う。代数的な制約により、超共形対称性を完全に保存することは不可能であるが、部分的な保存は可能である。この保存される対称性の部分を指定すると、いくつかのパラメータを除いて境界条件が一意に定まることを明らかにする。

[1] D. Gaiotto and E. Witten, “Supersymmetric Boundary conditions in N=4 Super Yang-Mills Theory,” J. Statist. Phys. 135 (2009) 789–855, arXiv:0804.2902 [hep-th]

## AdS 時空の dS スライスによる dS ホログラフィの探索

吉城 諒平 素粒子理論研究室 (物理学専攻)

初期宇宙やブラックホールなどの極限的な状態を正しく理解するためには、重力と量子論を同時に扱う、量子重力理論が必要となる。特に重要な仮説としてホログラフィ原理があり、より具体的な例として AdS/CFT 対応が提案されている。AdS/CFT 対応では、AdS 重力と CFT の間の分配関数や場の対応関係がよく理解されている。一方で、現実の初期宇宙において時空は dS 時空であったと推定されているので、真に理解するべきは AdS/CFT 対応ではなく dS/CFT 対応である。しかしながら、AdS/CFT と同様の方法で dS/CFT の構築を試みると、ユニタリーでない、観測可能量が不明である、など様々な疑問点が生じてしまう。

本発表では、後藤郁夏人氏、西岡辰磨氏との進行中の共同研究に基づき、先述の問題を回避するための dS/CFT への新しいアプローチについて報告する。AdS/CFT 対応の下では AdS 時空と CFT をどのように対応させるかは理解されている。また AdS 時空と dS 時空は共に極大対称空間であるから、AdS 時空から自然な方法で次元の低い dS 時空を取り出すことができる。これと同様の操作を AdS と対応する CFT でも実行できると、dS/CFT 対応が構築できると期待される。

## サブピコ秒 X 線ストリークカメラを用いた高時間分解計測方法の開発 明松凜也 藤岡研究室（物理学専攻）

高強度レーザーを物質に集光照射すると、高エネルギー密度プラズマが生成され、その内部で核融合反応が起こる。プラズマの加熱および冷却ダイナミクスを時間分解計測し、高エネルギー密度プラズマの形成過程を理解することは、核融合反応の効率化や反応量の増大において不可欠である。本研究の目的は、サブピコ秒の時間分解能を有する X 線ストリークカメラ (X-ray Streak Camera: XSC) を用いた高速時間分解 X 線分光計測手法を確立することである。本 XSC は低ジッター動作を実現するため、被観測 X 線の到達時刻と同期した短パルスレーザーを光スイッチユニットに照射し、高速掃引電圧を印加する構造を採用している。入射した信号光は時間軸方向に偏向され、時間情報を保持したストリーク像として記録される。観測時間幅は約 70 ps と極めて狭く、かつ、トリガー用レーザーパルスと高速掃引電圧パルスとの時間差が、レーザーパルスの強度、エネルギー、パルス幅に依存する可能性がある。このため、実験運用環境下における時間差の実測が重要となる。本実験では、レーザー科学研究所が保有するターゲット照射用レーザーと同期したサブピコ秒プローブレーザーを光トリガとして用いた。プローブレーザーの一部を光スイッチ駆動用のトリガ光として用い、残りを波長変換して生成した紫外光を被観測光とすることで、両者の時間差を測定した。その結果、得られたストリーク像には時間軸方向にショットごとの差が観測され、これは光スイッチによって印加される掃引電圧の大きさの揺らぎが一因であることが示唆された。プローブレーザーのパルスエネルギーを向上させることで、光スイッチ駆動の安定化が期待され、ジッターの低減および目的とする観測時間幅内への像の収録が可能になると考えられる。本研究の成果により、サブピコ秒 XSC を用いた高時間分解 X 線分光計測に向けた基盤技術を構築することができた。

## 高強度レーザーとキャパシターコイルターゲットを用いた 磁気リコネクションに関する研究 大村リョウ 藤岡研究室（物理学専攻）

磁気リコネクションは、太陽フレアや地球磁気圏サブストームに代表される爆発的なエネルギー解放を伴う天体现象の駆動機構として重要な役割を果たしており、宇宙空間において普遍的に発生する現象である。しかし、ミクロな拡散領域とマクロな大域構造という大きく隔たった空間スケールにまたがる現象を統一的に理解することは依然として困難であり、衛星観測や数値シミュレーションには限界がある。本研究では、制御された実験環境下で磁気リコネクションを生成し、関連する物理量や加速粒子を直接測定可能な研究プラットフォームとして、レーザー駆動キャパシターコイルを採用した。制御環境下での磁気リコネクション実験において、磁場強度とプラズマ密度を同時に測定し、アルフベン速度を評価することを目的とした。アルフベン速度は磁場強度と質量密度によって決まる固有の伝播速度であり、リコネクションの進行速度やエネルギー解放を規格化・評価する上で重要な物理パラメータである。磁場計測にはプロトンラジオグラフィー法を用いた。レーザー照射された薄膜表面に形成される電場によって陽子が加速される Target Normal Sheath Acceleration (TNSA) 機構により生成した陽子ビームの、ローレンツ力による偏向を解析することで磁場強度を決定した。さらに、変形マッハ・ツェンダー型干渉計を構築し、干渉縞の歪みから電子密度の空間分布を導出した。これらの計測を同一ショットで実施することにより、磁場と電子密度の空間分布を同時に取得することに世界で初めて成功した。得られたデータからアルフベン速度の評価が可能となり、本研究により、レーザープラズマ磁気リコネクション実験における磁場および密度の同時測定手法が確立された。これにより、アルフベン速度の定量評価に向けた実験的基盤を構築することができた。

## AVF サイクロトロンにおけるビーム性能向上のための入射条件の探索

板倉菜美 RCNP 加速器研究部門（物理学専攻）

大阪大学核物理研究センターでは、AVF サイクロトロン (AVF) およびリングサイクロトロンを用いて、陽子、重陽子、 ${}^3\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}$  などの軽イオンから Ar,Xe などの重イオンを利用した原子核物理実験が行われている。さらに、陽子ビームを一次ビームとして中性子やミューオンなどの二次粒子を生成・利用する研究や、 ${}^4\text{He}$  ビームによるアスタチンなどの短寿命 RI の製造による核医学研究も推進されている。ここで、これら多様なビームのうち特に汎用される陽子ビームの高強度化および高品質化が注目された。

高強度・高品質な陽子ビームの生成における課題として、AVF における加速ビーム引き出し時の損失低減および引き出し効率の向上が挙げられる。AVF 内の加速軌道は複雑であり、粒子による空間電荷効果がビームの挙動に大きく影響する。これを解決するためには、加速開始前のビームの位相分布や空間的広がりを適切に制御し、引き出しに適したビーム形状を形成する必要がある。

本研究の目的は、AVF に入射した直後のビームに着目し、引き出し効率向上に寄与する初期ビーム条件を探査し、インフレクターなどの入射ライン機器の最適化の指標を得ることである。そのため、シミュレーションによる AVF 内での空間電荷効果を伴うビームの挙動について解析を行った。まず、粒子軌道計算コード OPAL による単粒子軌道計算により、等時性磁場を求めた。磁場分布は磁場計算ソフト OPERA-3d で AVF を仮定した三次元モデルを作成し、計算した。次に、この磁場分布を用いて多粒子軌道計算を実施し、ビーム引き出し要素であるデフレクターに到達する粒子の分布およびビーム性能を解析した。デフレクターに到達したビームを AVF からの取り出しひとと定義し、その強度および品質と入射時のビーム初期条件との相関について議論した。

## $\pi^-$ メソンビームからの閾値近傍 $\phi$ メソン生成反応を用いた $\phi$ メソンと核子の相互作用の研究

東 昌徳 核物理研究センター（物理学専攻）

ハドロンは素粒子であるクォークやグルーオンから構成されていることが知られている。ハドロン間相互作用はそれぞれのハドロンが 1 つずつクォークを出し合いそれを交換するクォーク交換とハドロン間で複数のグルーオンを交換するグルーオン交換で記述されている。クォーク交換は散乱実験などからよくしられているが、グルーオン交換についてはほとんどわからない状況にある。 $\phi$  メソンは核子と全く異なるクォークからなるため、 $\phi$  メソンと核子の相互作用はグルーオン交換が散乱を特徴づけていると期待されている。現在、 $\phi$  メソンと核子の相互作用の強さについて異なる結果が報告されており、 $\phi$  メソンと核子の相互作用はあまり分からぬ状況にある。

この状況を開拓するため、生成閾値近傍にあたる  $\pi^-$  メソンの入射運動量が  $1.5 \sim 1.8 \text{ GeV}/c$  での  $\pi^- + p \rightarrow \phi + n$  の反応断面積測定から低エネルギー  $\phi N$  散乱パラメータを決定できるか検討した。生成閾値近傍での入射運動量に対する  $\pi^- + p \rightarrow \phi + n$  の全反応断面積(励起関数)は低エネルギー  $\phi N$  散乱パラメータの大きさ、特に散乱長の実部に大きく依存しているため、励起関数の測定から散乱パラメータを決定できることが分かった。この実験は大強度陽子加速器施設 J-PARC で行われる予定の E45 実験の検出器群で測定が可能である。 $\phi$  メソンの崩壊から生成される  $K^+$  メソンと  $K^-$  メソンを、三次元飛跡検出器 HypTPC を用いて検出し、中性子は欠損質量分布から同定する予定である。J-PARC E45 実験で散乱パラメータが決定できるか調べるため、モンテカルロシミュレーションを用いてどの程度  $\phi$  メソンが再構成されるかを評価した。十分な統計量があるため、散乱長の実部の統計誤差は十分に小さいことが分かった。

## LEPS2 ソレノイド実験における中性子検出器の性能評価

YAN BING 核物理研究センター(物理学専攻)

ハドロン模型では、バリオンは三つのクオークからなり( $qqq$ )、メソンは( $q\bar{q}$ )からなるのが一般的となる。ただし、ハドロンは色が中性になる組合せはこれだけに限らず、4つのクオークからなるメソン( $qq\bar{q}\bar{q}$ )や、5つのクオークからなるペンタクオークバリオン( $qqqq\bar{q}$ )のような粒子も存在しうる。近年、ペンタクオーク候補  $P_c(4312)^+$  が報告されている一方、 $\Theta^+$  は過去に存在が主張されたが、現在も確定には至っておらず検証が続いている[1-4]。

過去の  $\Theta^+$  の探索では、標的核子のフェルミ運動が  $\Theta^+$  の質量分布を劣化させるという課題があったので、最大 2.4 GeV の光子ビームを使った  $\gamma n \rightarrow K^- \Theta^+ \rightarrow K^- K^+ n$  反応で  $\Theta^+$  の探索を行うことを考案した。SPring-8 の大型放射光施設のビームラインを用いる LEPS2 ソレノイド実験を想定し、 $K^-$ 、 $K^+$  の運動量はソレノイドスペクトロメータで測定し、終状態中性子は飛行時間測定により四元運動量を与える。 $K^+ n$  系の不变質量  $M(K^+ n)$  を再構成し、 $\Theta^+$  を探索する。この方法では、標的中性子のフェルミ運動の影響を無視できる。一方で、 $M(K^+ n)$  の再構成精度は  $K^+$  と中性子の運動量測定精度に依存し、とくに中性子の運動量測定精度は飛行時間測定精度に依存する。従って、中性子検出器の時間分解能を評価することが重要である。

本研究では、2022 年後半に実施した LEPS2 ソレノイド実験のデータを解析し、中性子検出器の性能評価を行った。中性子検出器はプラスチックシンチレータで構成され、検出器群の最下流に合計 48 本設置されている。リーディングエッジ型ディスクリミネータによる時間のズレを補正し、シンチレータの有効減衰長、シンチレーション光の有効伝播速度、時間分解能を評価した。伝播速度は  $1.5 \times 10^8 \sim 1.7 \times 10^8$  m/s の範囲にあり、減衰長は 0.7~1.1 m の範囲、時間分解能の範囲は 190~330 ps であった。

## 高次形式対称性に基づく絶縁体中の電磁場の非平衡有効場理論

吉村 源樹 原子核理論研究室 (物理学専攻)

対称性は物理の体系的な理解に役立つ重要な概念である。近年では対称性の一般化が注目を集めしており、その代表例が高次形式対称性である。従来の対称性では局所的な演算子のみに着目してきたが、高次形式対称性では線や面などの空間的な広がりを有する演算子の変換則を記述する。身近な例として、真空中での電磁気学は、U(1) 1 次形式対称性の自発的破れの低エネルギー有効理論になっており、質量ゼロの光子はその南部-Goldstone モードとして解釈できる。また、この対称性は Wilson ループと呼ばれる線状の演算子を非自明に変換する。

有効場理論は、低エネルギー・集団的自由度のみを抽出してダイナミクスを記述する近似的な理論である。特に実時間形式の有効場理論は、有限温度量子系の低エネルギーダイナミクスを記述する手法として、ここ十年で急速に発展している。U(1) 1 次形式対称性の存在下における実時間有効場理論は、対称相では磁気流体力学に一致するが、対称性が自発的に破れた相については未確立であった。

本研究では、U(1) 1 次形式対称性の自発的破れに基づき、有限温度・実時間における有効場理論を体系的に構成する一般的な手法を与えた。この構成では、量子系の熱平衡条件を表す動的久保-Martin-Schwinger 対称性を理論の基本原理として組み込むことで、揺動散逸関係や Onsager の相反関係といった平衡系の普遍的性質が自動的に満たされる。得られた理論は、絶縁体中の電磁気学に対して微視的モデルに依らない有効記述を与える。更に、この枠組みに基づいて、有限温度電磁場におけるエントロピーカレントの一般的構成法を与え、非平衡下における電場・磁場の双対性を定式化した。本修士論文の成果は文献\*にまとめられている。

\* GY, Y. Akamatsu and Y. Hirono, “Effective field theory for dissipative photons from higher-form symmetries” arXiv:2601.00605 [hep-th].

## 1 次元スピン系における不純物の非エルミートダイナミクス

坂下陽亮 原子核理論研究室(物理学専攻)

環境と相互作用する量子系(量子開放系)は、デコヒーレンスや散逸といった現象を引き起こす。これらの現象は、非エルミートな有効ハミルトニアンによって記述される。Quark-Gluon Plasma(QGP)中の重クォーク対(クオーコニウム)の溶解現象に関して、重クォーク間の非エルミートなポテンシャル(複素ポテンシャル)によるデコヒーレンスが重要であることが指摘されている。その他の物理系として、Fermi 気体中や超流動体中の不純物原子間の複素ポテンシャルも議論されている。これらの系はすべて空間 3 次元で計算されており、その複素ポテンシャルの虚部は不純物間の距離の 2 乗の逆数に比例する形で減衰することが示されている。この減衰則は、不純物と媒質粒子の 2 体衝突がデコヒーレンスを支配していることによる。

本研究では、1 次元スピン系に不純物を加えた系における自己エネルギー及び複素ポテンシャルを計算した。特に横磁場 XY 模型における解析を行い、連続スペクトルを持つスピンと不純物との 2 体衝突によって、自己エネルギー及び複素ポテンシャルが虚部をもつことを示し、その振る舞いを調べた。その結果、虚部はスピンのサイト数  $L$  に対して  $\ln L$  なる対数発散を示した。対数発散は、速度 0 のスピン励起が不純物と長時間の相互作用をすることによって引き起こされると考えられる。また、複素ポテンシャルの虚部は空間 1 次元を反映し、不純物間の距離  $I$  に対して  $\ln I$  に従うことも示した。

## Landau ゲージにおける Partial-length Polyakov line 相関関数

Jiang Xinyi クォーク核理論研究室(物理学専攻)

先行研究では、 $cc\bar{b}\bar{b}$  系における charm quark 質量、中心力ポテンシャル、およびスピン依存ポテンシャルを、河内一佐々木条件を課すことによって、格子 QCD モンテカルロ計算から自己無撞着に決定し、それらのゲージ依存性が議論された。Coulomb ゲージでは、中心力ポテンシャルは Cornell 型の関数形を示し、重クォーク極限において Wilson loop から計算される static quark potential に漸近する。一方、Landau ゲージでは、長距離において線形的な振舞いが破綻しているように見える。このため本研究では、主として Landau ゲージにおける charm quark の 4 点相関関数の重クォーク極限について調べる。重クォーク質量極限では、charm quark の 4 点関数は Partial-length Polyakov line(PPL)相関関数に帰着する。まず、摂動的に計算可能な QED の例を考え、Coulomb ゲージにおける PPL 相関関数はスペクトル表示が可能であり、それを用いて、Coulomb ポテンシャルを抽出できることを示した。一方、Landau ゲージでは、ゲージ固定行列が時間方向に拡がりを持っており、ポテンシャルに悪さをするが、その寄与は PPL 相関関数の長さ  $T$  が大きくなるにつれて減衰することが分かった。次に、lattice QCD で大きな  $T$  を採用し、 $32^3 \times 64$  の格子で Landau ゲージ固定された PPL 相関関数と Wilson loop の数値計算を行った。その結果、QED の例から期待されたように、PPL の長さが大きくなるにつれ、Wilson loop から得られる静的クォークポテンシャルに近づく振る舞いが観測された。しかし長距離領域では gauge artifact の影響が大きく、閉じ込めポテンシャルの形を示すことは現実的に非常に困難であることが分かった。本発表では、以上の結果を説明した上で、次のステップで予定している、より大きな  $64^3 \times 192$  の格子を用いた数値計算の Wilson loop の結果についても紹介する。

## 多層膜ミラーを用いたサブミクロン領域での未知相互作用の探索

吉川侑輝 核物理研究センター（物理学専攻）

自然界に存在する 4 つの力の内、重力だけ極端に弱い階層性問題があり、その解決案として余剰次元という考え方がある。この存在の探索が未知相互作用の探索という形で行われているが、図 1 のように探索領域は理論の予想する余剰次元のスケールに足りていないので、さらに進んだサブミクロン領域の探索が期待される。未知相互作用を含む重力ポテンシャルは、次のように Yukawa 型のポテンシャルを追加することで表現される。

$$V(r) = -\frac{GmM}{r} \left( 1 + \alpha e^{-\frac{r}{\lambda_G}} \right)$$

従来のナノ粒子散乱の方法では、1 つのナノ粒子中の原子の数分の干渉しか見ておらず、別のナノ粒子との干渉は見ていない。そこで、その粒子を規則的に配置することで、干渉を増幅させられると考えた。そこで、本研究では 2 種類の材料(NiC, Ti)が規則的に重なった多層膜ミラーが利用される。そして、図 2 のように、未知力と核力のポテンシャルの形状の違いにより、反射率の違いが生まれることが予想される。この予想を確かめるため、J-PARC の MLF で中性子干渉実験を行った。（赤：核力と未知力、青：核力）255 層の多層膜ミラーによる実験で中性子による干渉縞が確認され、核力による反射率と一致した。しかし、本実験では、現在の最高感度に対して 2 衍程度足りていない。本修士論文では、実験結果と感度を上げるための方法について報告する。

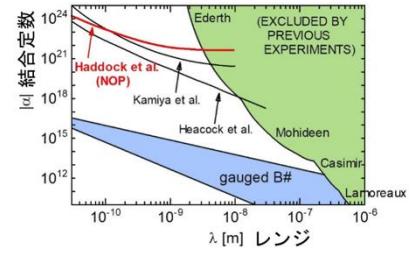
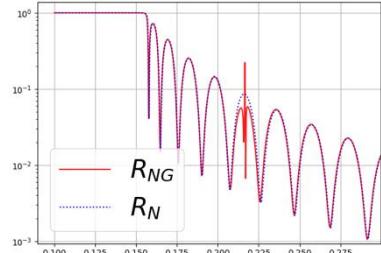


図 1.  $\alpha - \lambda_G$  plot



移行依存

## 高エネルギー電子ビームを用いた Prodrug の活性化に関する研究

内藤圭祐 細貝研究室（物理学専攻）

がん治療は手術療法、放射線療法、薬物療法の三つに大別される。手術療法は腫瘍の直接的切除が可能である一方、身体を切開する侵襲性をもつたため、患者への身体的負担が大きいという課題がある。放射線療法は非侵襲的治療法であるが、照射野周辺の正常組織に対しても放射線障害を引き起こすという問題がある。さらに、薬物療法は全身投与が基本となるため、治療効果が腫瘍局所に限定されず、全身性の副作用を生じることが問題とされている。

そこで、私たちの研究室ではそのままでは薬として働くかず、体内で活性化して初めて薬として機能する薬剤である ProDrug を身体投与し、高エネルギー電子ビームをトリガーとして用いることで、がん組織において選択的に活性体へと変換する、非侵襲かつ副作用の少ない治療法の確立を目的として研究を行っている。その手段として、従来の高周波加速器により実現される加速電場と比較して 1000 倍以上に相当する約 100 GV/m の加速電場を発生可能なレーザー航跡場加速（Laser Wakefield Acceleration: LWFA）を用いることで、超小型かつ高エネルギーの電子ビーム生成が可能となる。これにより、大型加速器に伴う空間的制約および建設・運用に要する資金的課題を同時に解決できる。この特長は先述した電子線を用いたがん治療の普及に寄与することが期待される。しかしながら、電子ビーム照射においては、がん組織のみならず周囲の正常組織にも照射が及ぶため、ProDrug が正常細胞内においても活性化される可能性がある。その結果、正常組織に対する毒性の増加、すなわち副作用の増大を招くことが懸念される。

本研究では、ProDrug のモデル基質を用いて高エネルギー電子ビームを照射する際にがん組織の選択性の向上に関する実験を行い、がん組織を模擬した領域においてのみ活性体の増加を確認した。

## COMET Phase-Iに向けた基板改良によるCDC読み出し系統合と 宇宙線を用いた性能評価

上田隼也 青木研究室(物理学専攻)

COMET Phase-Iは、原子核軌道上のミューオンが電子に転換する $\mu - e$ 転換過程を探索する実験である。この過程は素粒子標準模型で禁止されているため、その発見は新物理の証拠となる。 $\mu - e$ 転換似ともない放出される電子は105 MeV/cの一定の運動量を持っており、磁場中の飛跡検出器Cylindrical Drift Chamber (CDC) で運動量を測定することで検出する。背景事象の通常の崩壊でんしと分離するため、CDCには信号電子の運動量領域で200 keV/c以下の運動量分解能が要求される。現在CDCや周辺基板の動作試験を進めている。

これまで、CDC信号読み出し基板RECBEにクロック・トリガー、ファームウェア信号を分配するRECBE I/Fはこれまで読み出し系の動作試験に使用されてきた。しかし、実験本番での運用にあたってはいくつか課題が存在した。本研究ではRECBE I/Fを実験本番の仕様に合わせ改良を行い、動作試験を実施した。動作の検証後、改良したRECBE I/FをCDC読み出し系に組み込み、CDC読み出し系のエレクトロニクスの構築を完了した。

さらに、構築したCDC読み出し系とおもに宇宙線を用いてCDCの性能評価を行った。CDCの読み出し領域拡大や周辺基板の実装により増大したノイズを低減し、低閾値での性能評価を行った。また、約一ヶ月取得したデータを用いて長期の動作の安定性についてや周辺環境の変化による性能への影響についても評価した。

## COMET Phase-I にむけたトリガー検出器開発

住村 明紀 青木研究室 (物理学専攻)

COMET Phase-I は、Al 原子核を用いたミューオン電子転換過程を探索する実験である。この反応は、標準模型では荷電レプトンフレーバー数保存則によって強く抑制されているため、新物理に感度がある。本実験では、主トリガー検出器に Cylindrical Trigger Hodoscope (CTH) を用いる。CTH は信号電子を捉え、データ取得のトリガー発行を行うとともに、粒子の入射時刻を決定し、飛跡検出器に対する時間基準を与える。このため CTH にはトリガー計数率の削減と、1 ns 以下の時間分解能に加え、暗電流起因の誤トリガーを抑制するため光量 40 p.e. 以上が要求される。CTH はシンチレーターを用い、光学ファイバーバンドルでシンチレーション光を輸送し、半導体光検出器 (SiPM) で読み出す。SiPM からのアナログ信号をアナログ回路で波形整形し、信号読み出し回路で信号の波高とヒット時刻をデジタル化する。本研究では、CTH を構成するカウンターおよび電子回路基板を製作し、実機と同じ構成の試作機を初めて完成させた。この試作機を用いて、宇宙線による性能評価を実施した。第一に、アナログ波形を直接読み出す試験により、カウンターの出力光量評価およびアナログ回路段までの時間分解能評価を行った。第二に、全ての電子回路基板を接続した状態で信号読み出し試験を行い、デジタル化処理を含めたシステム全体としての時間分解能を評価した。さらに、本番環境を想定した 4 重同時計数による粒子の入射時刻の決定能力についても評価した。その結果、アナログ波形を直接読み出した評価では光量、時間分解能とともに目標を達成した。一方、カウンター単体を読み出し回路のヒット時刻で評価した場合、目標時間分解能を僅かに満たさなかった。しかし、4 重同時計数による入射時刻決定では時間分解能 1 ns を満たし、運用上最も重要な入射時刻決定能力について要求達成を実証した。

# COMET Phase-IのDetector Solenoidのための 磁場測定システム開発

高見翔太 青木研究室（物理学専攻）

COMET Phase-I 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。この過程は標準模型ではその分岐比が厳しく抑制されており、その実験的観測は、新物理の直接的証拠となる。この過程で生じる信号電子は 105 MeV/c の運動量を持つ。アルミニウム標的およびその周辺に設置する中空円筒型のガス検出器は超伝導ソレノイド磁石 Detector Solenoid (DS)内に設置され、信号電子の螺旋運動の曲率より信号電子運動量を測定する。したがって、DSのソレノイド磁場を高精度で測定することが必要である。

COMET Phase-I で達成する感度を実現するために  $O(10^{-4})$  T の精度で磁場測定を行う必要がある。この精度の測定の実現には、測定位置を詳細に追跡することが要求される。そこで、複数のリフレクターを磁場測定器に取り付け、磁場測定とレーザートラッカーによるリフレクターの精密位置測定を同時に行うことができる磁場測定器を開発した。レーザートラッカーの制御をするための API と測定器の駆動を行う超音波モーターを制御するプログラムを Python ベースで開発し、統合した。簡易的な支持構造に測定器を取り付け、統合したプログラムを用い、本番同様の走査の動作確認を行い、位置測定精度を評価した。

物理学専攻  
素粒子・原子核グループ  
会場：H701  
2月 13 日（金）

## 超高エネルギー宇宙線の解明に向けた巨大双極子共鳴からの 荷電粒子崩壊の測定

笹川 陽平 民井研究室（物理学専攻）

宇宙空間から地球へ降り注ぐ宇宙線の中で極めてエネルギーの高い宇宙線は、超高エネルギー宇宙線と呼ばれている。超高エネルギー宇宙線は、そのエネルギーの高さから銀河系外の大規模構造の中で加速され、銀河間空間を伝播して地球に飛来していることが予想されている。そのため、銀河系外の発生起源で起こっている宇宙空間の最高エネルギー領域の物理現象を解明するために重要な情報を含んでいることが示唆されている。PANDORA プロジェクトでは、銀河空間伝播中に起こす光核反応の精密測定を通じて、銀河間伝播中のエネルギー損失機構を解明することを目標としている。

銀河間空間で起こす光核反応で最も支配的な巨大双極子共鳴という励起状態への遷移は、原子核同士のクーロン散乱によっても遷移することができる。そのため、陽子ビームの非弾性散乱 ((p,p')反応) を超前方角で測定を行った。また、巨大双極子共鳴の状態への励起後の崩壊荷電粒子の測定は、実光子ビームの測定よりも高精度で測定を行えることから、この手法を用いた。

実験は核物理研究センターの WS コースで GrandRaiden スペクトロメータを用いて行い、散乱槽周辺にシリコン半導体検出器アレイ (SAKRA) を設置し、崩壊荷電粒子の同時測定を行った。この測定では、複数の原子核標的が用いられた。特に今回解析を行った  $^{27}\text{Al}$  原子核標的での測定結果は、標的の同位体存在比が 100% であることと化学的安定性から実験施設間での測定結果の比較に用いられる。本発表では、GrandRaiden スペクトロメータやシリコン検出器のデータ解析と、散乱断面積と荷電粒子崩壊の崩壊分岐比の解析結果を報告する。

## 異種の GEM におけるイオンバックフローの抑制に向けた研究

柴北洋明 民井研究室（物理学専攻）

核子物質の状態方程式の解明のために密度二次の項の係数である非圧縮率を決定する必要があり、そのためには不安定核を含む原子核においてアイソスカラー型巨大単極共鳴 (ISGMR) の系統的測定が必要である。不安定核の ISGMR の逆運動学測定のためにアクティブ標的型 Time Projection Chamber(TPC) である CAT-M の開発が進行中である。CAT-M は重水素ガスで満たされており、入射した不安定核ビームがプローブである重陽子と反応する。重水素は TPC の動作ガスとして、反応前後のビームや反応後の重陽子の飛跡検出にも使われる。これらの粒子が重水素ガスを電離することで発生した電子は、フィールドケージ内に生成された一様電場中をドリフトしたのち、多孔板状の電子増幅機構である Gas Electron Multiplier(GEM) で増幅され読み出される。ガス標的では標的数が少ないため十分な統計量を得るには大強度ビームが必要であるが、ビーム強度を 1 Mcps 程度まで大きくすると電子増幅時に発生した陽イオンがフィールドケージに流れ込んで電場を歪めるイオンバックフロー (IBF) という現象が問題となってくる。IBF により飛跡測定に誤差が生じるため、大強度ビーム照射時には IBF の抑制が課題となる。先行研究では GEM を複数枚重ねて孔の位置をずらすことによってイオンをせき止める手法が提案されている[1]。我々は孔の配置のパターンが異なる 2 種類の GEM を開発し、これらを重ねて使用することで IBF の抑制を目指している。

本研究では異種の GEM を重ねた際の GEM 間における電子およびイオンの移動のシミュレーションを行った。さらにこの結果をもとに量子科学技術研究開発機構(QST) の加速器施設 HIMAC にて小型 TPC を用いた大強度重イオンビーム照射実験を行った。本発表では実験の詳細を紹介し、IBF を抑制する上で最適な GEM への印加電圧の条件について議論する。

[1] H. Natal et al., Journal of Instrumentation, 13, 18, 07025, (2018).

## 逆運動学条件下クラスター ノックアウト測定のための TOGAXSI GAGG(Ce)カロリメーターの性能評価

岡村拓実 川畠研究室 物理学専攻

原子核のクラスター模型は、軽核の  $\alpha$  凝縮や重核の  $\alpha$  崩壊を理解する上で極めて有効である。さらに、最新の理論研究[1]により、核物質中の d, t,  $^3\text{He}$ ,  $\alpha$  クラスターの自発的な形成が予測されている。ONOKORO プロジェクトでは、中重核領域をはじめとした原子核中のクラスター形成メカニズムを、原子核からクラスターをノックアウトする反応により解明することを目指している。

このプロジェクトでは、不安定核ビームを用いた逆運動学条件下でのノックアウト測定のために、Si ストリップ検出器と GAGG(Ce)カロリメータから構成される TOGAXSI 検出器を開発し、2025 年 6 月に  $^{50-52}\text{Ca}$  ビームを用いた測定を実施した。

本研究では、GAGG(Ce)検出器の挙動理解を目的とし、(1)軽イオン弹性散乱による発光量の消光効果の検証と、(2)実験中に飛来した大量の背景粒子が GAGG(Ce)カロリメーターに与えた影響の評価を行った。(1)では、先行研究 [2] の発光効率との比較を行い、(2)では背景粒子の照射によって生じたシンチレーション光読み出し用のフォトダイオードのリーク電流増加とその影響について調査した。

[1] S. Typel, J. Phys. Conf. Ser. 420, 012078 (2013).

[2] T. Furuno et al., JINST **16**, P10012 (2021).

## $\alpha$ 非弹性散乱と崩壊粒子の同時計測による

### $^{24}\text{Mg}$ における $\alpha$ 凝縮状態の探索

下條暖人 原子核実験研究室 (物理学専攻)

原子核は陽子と中性子が核力によって結合した量子多体系である。原子核内で陽子 2 つと中性子 2 つが  $\alpha$  粒子として強く相関し、クラスターを形成する  $\alpha$  クラスター現象は核構造研究における重要な研究テーマの一つである。一例として、ホイル状態として知られる  $^{12}\text{C}$  の  $0_2^+$  状態は空間的に発達した  $3\alpha$  クラスター構造を有することが知られている。ホイル状態はまた、3 つの  $\alpha$  クラスターが最低エネルギー軌道 (0s 軌道) に凝縮した  $\alpha$  凝縮状態としても理解されており、この性質のために  $\alpha$  凝縮状態のスピン・パリティは  $0^+$  となる。 $\alpha$  凝縮状態の存在は質量数が 40 以下の自己共役な偶々核において理論的に予言されている。しかしながら、現実の原子核において  $^{12}\text{C}$  より重い核で本当に出現するのかは未だ明らかではなく、実験的な検証が必要とされている。

本研究では、 $^{24}\text{Mg}$  におけるアルファ凝縮状態の探索を行った。実験は大阪大学核物理研究センター (RCNP) で実施された。386 MeV に加速した  $\alpha$  粒子を  $^{24}\text{Mg}$  の薄膜標的に照射し、Grand Raiden 磁気スペクトロメータを用いて散乱された  $\alpha$  粒子の運動量を解析することで、 $^{24}\text{Mg}$  の励起エネルギーを決定した。さらに、励起状態から放出される陽子および  $\alpha$  粒子を Si 検出器アレイによって検出し、 $\alpha$  非弹性散乱事象と粒子崩壊事象の同時測定を行った。発達した  $\alpha$  クラスター構造を持つ状態では、平均場中を陽子と中性子が独立に運動する描像に基づく統計的崩壊と比較して、 $\alpha$  崩壊幅が増大すると期待される。 $\alpha$  崩壊幅が顕著に大きいいくつかの  $0^+$  状態を探索し、それらを  $\alpha$  凝縮状態の候補として報告する。

本研究における成果は、崩壊粒子検出器の立体角の小ささに起因する統計量の少なさに制限を受けている。発表者は大立体角 Si 検出器アレイ SAKRA の開発を行っており、これを用いた将来実験の展望についても述べる。

## 宇宙リチウム問題解決のための散乱粒子と崩壊粒子の 同時計測システムの開発および薄膜標的の作製

前里 優太朗 原子核実験研究室（物理学専攻）

標準ビッグバン模型には、 $^7\text{Li}$  の推定生成量が観測推定値の 3 倍に過大評価される深刻な問題が知られており、これは「宇宙リチウム問題」と呼ばれている。 $^7\text{Li}$  は主にビックバン元素合成過程で生成された  $^7\text{Be}$  が電子捕獲崩壊することで生成される。そこで、 $^7\text{Be}$  が  $^7\text{Li}$  へ崩壊する前に、 $^7\text{Be} + ^3\text{He}$  および  $^7\text{Be} + ^4\text{He}$  の未知の共鳴状態を経て  $^7\text{Be}$  が他の原子核に転換されることで、理論計算値における  $^7\text{Li}$  の生成量が減少し、観測値とのずれが解消される可能性に着目した。

$^7\text{Be} + ^{3,4}\text{He}$  の共鳴状態は非常に幅の狭いピーク構造を持ち、断面積の小さな状態であると考えられている。そこで  $^{10,11}\text{B}(^3\text{He}, t)^{11,10}\text{C}$  反応を大阪大学核物理センターの高分解能スペクトロメーター・グランドライデンを用いて測定する。 $^{10,11}\text{C}$  の励起エネルギースペクトルを高分解能で取得することで、 $^7\text{Be} + ^{3,4}\text{He}$  の未知の共鳴状態を探索する。また、真空槽にシリコン検出器を設置し、共鳴状態からの崩壊粒子の測定も行い崩壊様式を明らかにする。

本研究では本実験に向けて以下の 2 点の開発を行った。グランドライデンの焦点面検出器群はアナログのトリガーを必要としない連続読み出しデータ収集システム (DAQ) を用いている。一方、シリコン検出器はトリガー型の DAQ である。データ収集方式が異なる両者のデータを統合し、同一イベントを再構成するシステムを開発した。また、高分解能で測定するためには、標的中のエネルギー損失を最小限に抑える必要があるため、 $^{10,11}\text{B}$  の薄膜標的の作製およびその不純物量の評価を行った。本講演では、以上の開発内容について報告する。

## スピン偏極 $^{33}\text{Mg}$ 核の $\beta$ 崩壊と $\beta$ 遅発中性子崩壊による $^{33}\text{Al}$ 核と $^{32}\text{Al}$ 核の研究

松田 基弥 原子核実験研究室（物理学専攻）

我々のグループは中性子魔法数 20 の消失で知られている逆転の島近辺の中性子過剰核を系統的に研究し、 $^{30}\text{Mg}$  核や  $^{31}\text{Mg}$  核で変形共存の出現を明らかにした。今回、中性子数が魔法数 20 で逆転の島の陽子数側境界に位置する  $^{33}\text{Al}$  核と、その隣の  $^{32}\text{Al}$  核に注目し、スピン偏極  $^{33}\text{Mg}$  核から  $^{33}\text{Al}$  核と  $^{32}\text{Al}$  核への  $\beta$  崩壊と  $\beta$  遅発中性子崩壊の実験をカナダの TRIUMF で実施した。 $^{33}\text{Mg}$  核では  $\beta$  崩壊の Q 値が大きく中性子分離エネルギーが小さいことから  $\beta$  遅発中性子崩壊の分岐比が大きくなるため、 $^{33}\text{Al}$  核の中性子非束縛状態や  $^{32}\text{Al}$  核の束縛状態の情報も得ることができる。スピン偏極核から放出される  $\beta$  線の空間非対称性を利用する我々独自の手法により、 $^{33}\text{Al}$  核の励起状態のスピン・パリティを決定できる。

スピン偏極した  $^{33}\text{Mg}$  核の  $\beta$  崩壊と  $\beta$  遅発中性子崩壊に伴う  $\gamma$  線は Ge 検出器で測定し、 $\beta$  線は小型プラスチックシンチレーターで検出した。スピン偏極軸方向に配置された 2 台の  $\beta$  線検出器を用いて、 $\beta$  線の空間非対称性を求めた。中性子は、プラスチックシンチレーター (0.4~2.5 MeV 中性子用) と、Li ガラスシンチレーター (数十~500 keV 中性子用) を用いて測定した。中性子のエネルギーを精度よく求めるために飛行時間法を用いた。

$\beta$  線-中性子- $\gamma$  線、 $\gamma$  線- $\gamma$  線の同時計測データを解析することで、 $^{32}\text{Al}$  核のエネルギー準位を構築した。また、 $^{33}\text{Al}$  核の中性子非束縛状態の準位構造を構築し、 $\beta$  線の非等方性から準位のスピン・パリティの決定を行った。得られた  $^{33}\text{Mg}$  核の崩壊様式を大規模殻模型計算と比較して、原子核構造を議論する。

## **$^{48}\text{Ca}$ 同位体濃縮に向けた大強度レーザーダイオードの開発と ラビ振動を利用した高効率原子ビーム偏向法の開発**

谷川秀憲 原子核実験研究室（物理学専攻）

CANDLES 実験では、 $\text{CaF}_2$  結晶を用いて  $^{48}\text{Ca}$  のニュートリノレス二重ベータ崩壊事象の探索を行なっている。 $^{48}\text{Ca}$  は二重ベータ崩壊同位体の中で最も高い Q 値(約 4.27 MeV)を持ち、バックグラウンド放射線の影響を受けにくいという利点を有する。一方で、自然存在比は約 0.187 % と非常に低く、十分な感度を得るためにには同位体濃縮が不可欠である。

同位体濃縮に向けては、これまでレーザー偏向法に基づく選択的分離手法の開発が進められてきた。レーザー偏向法とは、加熱によって生成した Ca 蒸気をコリメートすることで原子ビームを形成し、このビームに対して直交方向から  $^{48}\text{Ca}$  の共鳴波長に同調したレーザー光を照射することで、共鳴した同位体のみに運動量を与えて軌道を偏向させる手法である。Ca では同位体ごとに共鳴周波数が異なるため、レーザー偏向法による同位体選択が有効である。しかし、励起された  $^{48}\text{Ca}$  による自然放出が光損失を引き起こし、分離効率を制限するという課題があった。そこで本研究では、 $^{48}\text{Ca}$  を誘導放出させることで光子損失を抑制し、ラビ振動を利用して分離効率を向上させる手法の開発に取り組んでいる。

現在はまずモデル系として自然存在比の高い  $^{40}\text{Ca}$  を対象とし、422.79nm の遷移に同調したレーザーを用いて蛍光スペクトル測定およびラビ振動の可視化を目指している。ラビ振動の観測にはドップラーシフトを低減する必要があり、そのためにはコリメートされた Ca 原子ビームが不可欠である。本研究ではコリメートされた Ca 原子ビームの生成およびドップラーシフトの測定を行い、将来的に  $^{48}\text{Ca}$  共鳴を用いたレーザー偏向法へと発展させることを念頭に、ラビ振動の観測に必要な基礎条件の整備を進めた。これらの進捗について報告する。

## **$0\nu\beta\beta$ 崩壊探索に向けた $\text{CaF}_2$ 蛍光熱量検出器のセンサー開発**

野田健太 原子核実験研究室（物理学専攻）

標準理論を超えた物理現象として、ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ ) が予測されており、極めて発生頻度の低い事象であるため、これまで観測された例はない。 $0\nu\beta\beta$  の観測は、ニュートリノのマヨラナ性の検証、物質優勢宇宙を説明する上で非常に重要である。CANDLES 実験においては  $^{48}\text{Ca}$  で  $0\nu\beta\beta$  事象の探索を行なっている。 $^{48}\text{Ca}$  は  $0\nu\beta\beta$  の崩壊 Q 値が候補核中最大であり、Q 値 (4.3 MeV) 付近にバックグラウンドが少ないことが求められる。しかし、既存の検出器の分解能 (FWHM  $\sim 4\%$ ) では  $0\nu\beta\beta$  事象の同定を行うには精度が不十分であることが判明している。よりエネルギー分解能を向上させるため、 $\text{CaF}_2$  蛍光熱量検出器 (分解能  $\sim 0.5\%$ ) の開発を行なっている。

$0\nu\beta\beta$  の同定方法は、放出される 2 電子のエネルギー和を測定することで行われる。 $\text{CaF}_2$  蛍光熱量検出器は、 $^{48}\text{Ca}$  を含んだ  $\text{CaF}_2$  結晶を希釈冷凍機を用いて 20 mK まで冷却する。結晶内部で放射線によるエネルギー損失は結晶中の Phonon に変換され、その Phonon による温度上昇を金属磁気熱量計 (MMC) により磁化変化へと変換する。さらに、その磁化変化を超伝導量子干渉計 (SQUID) で電圧変化として読み出す。Phonon をエネルギー量子として利用することで、高いエネルギー分解能を実現できる。

今発表では、 $^{241}\text{Am}$  線源の  $\alpha$  線 (5.5 MeV) を用いて、センサーのみのセットアップと結晶を含めたもので実験を試みた。センサーの性能評価、測定中に発生した問題、今後の課題について、報告を行う。

## Sr 同位体の相互作用断面積の系統的研究

安田圭吾 原子核実験研究室（物理学専攻）

原子核の半径（核半径）は基本的かつ重要な物理量である。安定核の核半径は電子散乱やアイソトープシフトなどの測定結果から質量数  $A$  の  $1/3$  乗に比例することがよく知られている。一方で、不安定核では様々な核構造の変化により、安定核に見られない中性子の増加に伴う核半径の増大が観測される場合がある。我々の研究グループは、不安定核の核半径を調べる手法として、核の実効的な大きさを反映する相互作用断面積の測定を行っている。

本研究では、変形の発現により核構造の急激な変化が期待される質量数 90–100 の Sr 同位体の C 標的に対する相互作用断面積を理研 RIBF で核子あたり 200–300 MeV で系統的に測定した。図 1 に本研究で導出した Sr 同位体の相互作用断面積の質量数依存性を示す。本講演では、実験・データ解析の詳細について述べ、この結果について議論する。

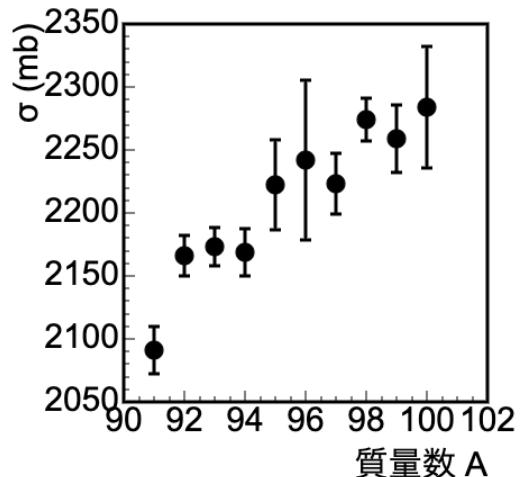


図1：Sr同位体の相互作用断面積

## アルファノックアウト反応による酸素 16 基底状態の アルファクラスター成分の研究

宮川 泰地 核物理研究センター（物理学専攻）

原子核基底状態波動関数への  $\alpha$  クラスター成分の混合は理論および実験の両面から示唆されているが[1]、その混合割合の実験的な量的評価は限定的である。 $(e,e'\alpha)$  反応は  $\alpha$  クラスター成分に対する感度を有するが断面積が小さく、一方で $(^6\text{Li},d)$  反応などの  $\alpha$  移行反応では、反応機構の複雑さから、モデル依存性が避けられないことが指摘されている[3, 4]。これに対し、高エネルギー陽子を用いた  $\alpha$  ノックアウト( $p,p\alpha$ )反応は、反応機構がインパルス近似で良く記述され、入射粒子が原子核内部の  $\alpha$  クラスターと直接相互作用するため、 $\alpha$  クラスター成分を比較的モデル非依存に抽出できる有力なプローブであることが知られている[4]。特に数百 MeV 領域では、歪曲の影響が弱まり、歪曲波インパルス近似(DWIA)による信頼性の高い断面積評価が可能となる。本研究では、二重閉殻かつ  $4n$  核である  $^{16}\text{O}$  を標的とし( $p,p\alpha$ ) 反応を用いて散乱陽子および放出  $\alpha$  粒子をダブルアームスペクトロメータにより同時計し、 $\alpha$  分離エネルギースペクトラルを再構成した。その結果、基底状態における  $^{12}\text{C} + \alpha$  成分の存在を示唆するピークが観測され、これに対応する散乱陽子の運動エネルギー分布および三重微分断面積を導出した。得られた実験結果を DWIA 計算と比較することにより、 $^{16}\text{O}$  基底状態に混合する  $\alpha$  クラスター成分の分光学因子を算出し、その量子的混合割合を定量的に評価した。

## J-PARC KOTO 実験の GPU を用いた High Level Trigger システムの性能と運用

小川大樹 南條研究室（物理学専攻）

J-PARC KOTO 実験では、中性 K 中間子の稀な崩壊  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\bar{\nu}$  を探す。この崩壊の素粒子の標準理論での崩壊分岐比は  $3 \times 10^{-11}$  と小さい。また、理論的不確かさも 2% と小さく、標準理論を超えた新物理に感度がある。

2024 年に KOTO 実験におけるデータ収集システムがアップグレードされた。これは Graphic Processing Unit(GPU)を活用した High Level Trigger(HLT)システムを含む。HLT システムでは GPU を用いて事象選択や波形圧縮をした後、データをハードディスクへ一時的に保存する。

これまで擬似データを用い HLT システムで処理可能なイベントレートや、ハードディスクへの書き込み速度は測られたが、入力レートが低く、ビームを用いたデータ取得を再現していなかった。そこで本研究では、KOTO 実験の実際のデータ取得によりこれらを測ることにした。その結果、4.2 秒のビーム取り出し周期あたり 32 k イベントまでデータを取り、データ保存用コンピュータ 1 台あたり最大 4.4 Gbps でデータが保存できることを確認した。

さらに本研究では、HLT システム運用の拡張も目ざした。 $K_L \rightarrow \gamma X$  および  $K_L \rightarrow 3\gamma$  崩壊に対するトリガーに、HLT システムでの事象選択を加えた。

また、HLT システムは全ての事象を扱うため、検出器や物理量の監視に適す。KOTO 実験では、信号事象と同時に他の K 中間子の崩壊などの別の事象が起こると、信号事象は排除される。この偶発的信号事象損失はビーム強度の瞬間的な変動に影響され、加速器調整で改善できる。本研究では、HLT システムに偶発的信号事象損失を見積もる監視機能を加えた。加速器調整時にはこの監視機能を使い、結果を直ちに得て、より良い加速器の制御を選べた。その結果ビーム強度の変動は減り、偶発的信号事象損失が減った。

## 高輝度 LHC ATLAS 実験で用いる シリコンピクセル検出器モジュールの閾値調整機構の性能評価

北野至 南條研究室（物理学専攻）

Large Hadron Collider (LHC) は、スイス・ジュネーブ近郊の地下 100m、周長 27km のトンネル内に建設された陽子・陽子衝突型の円形加速器である。ATLAS 実験の目的は、LHC を用いた新粒子の探索や素粒子標準理論の検証である。研究のさらなる発展のため、2030 年より瞬間ルミノシティを 2.5 倍以上に、積分ルミノシティを 6 倍以上にするという高輝度 LHC が計画されている。それに伴い、2026 年からのシャットダウン期間で、現行の内部飛跡検出器は全て新型シリコン検出器に入れ替えられる。新型シリコン検出器は約 1 万台の検出器モジュールからなり、検出器モジュールはシリコンセンサー、フロントエンドチップ、フレキシブルプリント基板で構成される。シリコンセンサーからの信号は、フロントエンドチップにより、 $50\mu\text{m}$  角のピクセル単位で読み出される。ピクセル毎にフロントエンドチップで閾値を設けることで、ノイズと区別して荷電粒子由来の信号が得られる。閾値はフロントエンドチップのレジスタ値で決まり、ピクセル毎に目標となる閾値に調整できる。ATLAS 実験グループでは調整後の閾値分布の幅が十分小さいことを課している。実機仕様となる検出器モジュールを作ったあと、目標閾値 1500e に調整することで良品・不良品の判定をする検査がある。しかし、目標閾値はその 1 点のみであり、それ以外の閾値の性能や閾値分布の幅は詳細に調べることができない。ところが、運用中は放射線損傷によりノイズが増え、信号出力が減るため、それに合わせて閾値を変更する。そのため本研究では、広範な目標値において閾値を調整した際の閾値分布の幅を調べた。また、閾値を調整できない不良ピクセルについて、原因を調査した。

# J-PARC KOTOII実験に向けた鉛シンチレータ 積層型カロリメータの開発

本間芽糸 南條研究室(物理学専攻)

素粒子物理学において、素粒子標準模型は、多くの実験結果を説明できる。しかし、標準模型は、物質優勢の宇宙や暗黒物質などは説明できない。これらの問題を解決するには、新物理が要る。こういった新物理が寄与し、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の崩壊分岐比が標準模型の予測からずれ得る。標準模型による予測と実測とのずれが有意であれば、新物理を示唆できる。現在、J-PARC KOTO 実験による  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  の崩壊分岐比の上限値がある。KOTO 実験では、標準模型の予測分岐比  $3 \times 10^{-11}$  に対し、 $10^{-10}$  の感度までの探索を見込む。さらに次世代の高感度実験として、J-PARC KOTOII実験がある。

KOTOII実験では、 $\pi^0$ が崩壊してできる 2 光子をカロリメータにより検出する。KOTO 実験ではカロリメータの直径は 1.9m だが、KOTOII実験では信号の検出アクセプタンスを増やすため、直径を 3m に増やす。そのため、新たな検出器を開発する。1 つの候補として、鉛とシンチレータの積層構造を波長変換ファイバーにより貫通させる、シャリュリック検出器がある。本研究では、まず、KOTOII実験カロリメータへの要求性能をまとめた。次に、シャシュリック検出器のモジュールの、鉛とシンチレータの各厚みやシンチレータの獲得光量等が分解能に与える影響を調査し、モジュールのデザインを決めた。最後に、実際にモジュールを作製し、ビーム試験により分解能等の性能を評価した。この結果を元に、シャシュリック検出器が KOTOII実験カロリメータとして使用可能であるかを議論する。

**物理学専攻  
物性グループ  
会場：D407  
2月12日（木）**

## スピニ $1/2$ 低次元磁性体（四量体鎖フェリ磁性及び直方格子反強磁性） の磁性の圧力効果

小寺智也 萩原研究室（物理学専攻）

本研究ではスピニ $1/2$ 低次元磁性体の四量体鎖フェリ磁性体( $\text{Cu}(3\text{-Clpy})_2(\text{N}_3)_2$ )と直方格子反強磁性体( $\text{Cu}(\text{pz})\text{Cl}_2$ ,  $\text{Cu}(\text{pz})(\text{N}_3)_2$ )について扱ったが、本発表では時間の関係から前者についてのみ発表するのでその研究内容を記載する。

$\text{Cu}(3\text{-Clpy})_2(\text{N}_3)_2$ は、アジ化イオンにより架橋された  $\text{Cu}^{2+}$ イオン( $S = 1/2$ )が一次元鎖を形成する銅錯体である[1]。本物質の磁性は、強磁性相互作用(F)と反強磁性相互作用(AF)がF-F-AF-AFの周期で配列する四量体モデルで記述されると考えられており、この相互作用の配列からスピニは3つが上向き、1つが下向きのフェリ磁性を低温で示すことが期待される[2]。常圧下の磁化率( $\chi$ )×温度( $T$ )プロットにおいて、約10Kで極小が観測され、飽和磁化を含む全磁化過程では飽和磁化の $1/2$ に広い磁化プラトーが観測されるなど、一次元フェリ磁性体としての特徴を示す[3]。本研究では、この化合物の圧力効果を調べるために、ピストンシリンダー型圧力セルを用いた高圧力下磁化率測定と電子スピン共鳴(ESR)測定を行った。圧力の増加に伴い、常圧下で観測された $\chi T$ 積の極小は0.17GPaという比較的低い圧力で消失した。また、最大圧力0.88GPaで約13Kにブロードな磁化率の極大を示す典型的な低次元反強磁性体の挙動へと変化した。量子モンテカルロ法による数値計算を行い実験と比較することで、この磁化率の変化が強磁性相互作用から反強磁性相互作用への変化に起因することを明らかにした。本発表ではこれらの詳細について報告する。

[1] A. Escuer *et al.*, Inorg. Chem. **37**, 4466 (1998).

[2] M. Hagiwara *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 943 (2003).

[3] M. Hagiwara *et al.*, Physica B **294–295**, 30 (2001).

## パルス強磁場下 LC 共振法の高感度化

小山宗晃 萩原研究室（物理学専攻）

Proximity Detector Oscillator (PDO) 素子を用いたLC共振法は、試料近傍に配置した検出コイルのインダクタンス変化を通じて共振周波数の変化( $\Delta f$ )を検出する手法であり、試料の電磁応答を非接触で捉えることができる。特に磁性絶縁体においては、 $\Delta f$ は磁化率と等価となるため、パルス強磁場下における磁気特性評価に用いられてきた[1]。また、検出コイルを圧力セル内部に配置できるという構造的特徴から、LC共振法は試料空間が著しく制限される高圧力下測定に適した手法である[2,3]。一方で、パルス強磁場下LC共振法では、コイル線材の磁気的・電気的性質の磁場依存性に起因する共振周波数のドリフトが重畠することで、微弱な試料信号の検出感度を制限する要因となっていると考えられている。しかし、コイル材料となりうる多種の線材に対して、磁化および電気抵抗を網羅的に測定し、それらと測定感度との相関を系統的に調査した研究はこれまでに無かった。本研究では、パルス強磁場下LC共振法の高感度化を目的とし、検出コイル線材に由来する共振周波数ドリフトの影響を定量的に評価した。銅、アルミニウム、リン青銅、マンガニン、黄銅、コンスタンタン、クロメルの7種類の線材について、磁化率・磁化、電気抵抗率および磁気抵抗を測定し、線材の磁気的・電気的性質が共振周波数シフト $\Delta f$ の変化量および検出感度に与える影響を調べた。さらに、反強磁性体 $\text{MnF}_2$ を評価試料として用い、スピニフロップ転移に対応する $\Delta f$ の大きさを指標として、共振回路の損失特性と検出感度との関係を明らかにした。発表では、これらの結果を基に、測定対象や実験環境に応じた検出コイル線材および形状の選択指針について議論する。

[1] S. Ghannadzadeh *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **82**, 113902 (2011). [2] K. Nihongi *et al.*, Phys. Rev. B **105**, 184416 (2022). [3] K. Nihongi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **94**, 113903 (2023).

## LC 共振法による量子磁性体 $\text{CsCuCl}_3$ のパルス強磁場下交流磁気応答 坂本裕太 萩原研究室（物理学専攻）

スピン 1/2 の三角格子反強磁性体  $\text{CsCuCl}_3$  では、量子スピン揺らぎ、スピン-軌道相互作用および Dzyaloshinskii-Moriya (DM) 相互作用に起因する磁気転移が観測されている[1]。1.1 K の  $c$  軸方向の磁化では、 $H_{\text{c}1} = 12.5$  T で umbrella 型から 2-1-coplanar 型への磁気転移が観測され、 $H_s = 31$  T で飽和する[2]。交流磁化率の実部( $\chi_n'$ )と同様の振る舞いを共振周波数のシフト( $\Delta f$ )として捉えることができる LC 共振法[3]を用いた  $\text{CsCuCl}_3$  のパルス磁場中磁化率測定の先行研究では、従来の誘導法では異常が観測されていない磁場領域において、振動構造が現れる磁場幅（中心磁場  $H_a$ ）や、鋭いピークが出現する磁場 ( $H_{c2}$ ) が新たに見出されたと報告されている[4]。本研究では、 $\text{CsCuCl}_3$ において観測されたこれらの交流磁化率の起源について明らかにするために、本物質の単結晶試料を用いて、共振周波数 (10 ~ 50 MHz) および温度 (1.4 ~ 4.2 K) でのパルス強磁場下磁化率測定を行った。共振周波数を高くするにつれて  $H_a$  は高磁場側へ、 $H_{c2}$  は低磁場側へと、それぞれ系統的にシフトする振る舞いを観測した。発表では、以上の結果について、非線形磁化率の高次項 ( $\chi_3', \chi_5'$ ) を考慮した上で議論する。

- [1] A. Sera *et al.*, Phys. Rev. **B** **96**, 014419 (2017).
- [2] H. Nojiri *et al.*, J. Phys. (Paris) **49**, Suppl. C8, 1459 (1988).
- [3] M. M. Altarawneh *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **80**, 066104 (2009).
- [4] K. Nihongi *et al.*, Phys. Rev. B **105**, 184416 (2022).

## 超伝導バルク磁石を用いた放射光 X 線 4 軸回折実験用 定常強磁場発生装置の開発 大谷洸葵 萩原研究室（物理学専攻）

我々はスキルミオンというスピンが渦を巻いた特異な磁気構造に注目しており、中でもフラストレート磁性体に現れるスキルミオンの放射光による直接観測を目指している。このスキルミオンの観測には、1 T を超える定常磁場環境下で、多軸回折計を用いた長時間にわたる広範な逆格子空間の走査が不可欠である。しかし、磁場中での回折測定を実現するためには、多軸回折計に搭載可能な無冷媒かつコンパクトな定常磁場発生装置が必要となる。そこで磁場発生源として、超伝導状態で外部磁場を捕捉して擬似的な永久磁石となる超伝導バルク磁石を使用することにした。具体的には、GM 冷凍機で冷却した超伝導体 GdBCO(直径 35 mm、高さ 12 mm、超伝導転移温度  $T_c \approx 92$  K)を 4 軸回折計に搭載することで定常強磁場下における回折実験を可能にする。放射光施設で着磁を行うためには可搬性の高いマグネットが必要であるため、小型パルスマグネットを使用した Pulsed Field Magnetization (PFM) 法を用いる。本研究では、コイル長 80 mm、層数 21 層の小型ワイドボア (80 mmΦ) パルスマグネットを開発し、最大磁場 15.2 T、パルス幅約 100 ms を確認した。コイル長は、バルク磁石のサイズに対する磁場均一度、GM 冷凍機への漏れ磁場の影響を考慮して決定している。また、パルスマグネットのボア内に断熱真空槽を挿入することで室温環境を実現し、着磁から回折計への搭載過程でバルク磁石の温度変化による捕捉磁場の変化を抑えている。さらに、X 線の透過度とパルス磁場による金属の発熱を考慮し、GM 冷凍機の真空を保持するシュラウドには炭素繊維強化プラスチック、輻射シールドにはアルミ蒸着フィルムを採用し、ほぼ完全な逆格子空間の走査が可能な半円球の開放角を実現している。本発表では装置の開発過程と、これらを用いた GdBCO の着磁実験の詳細について述べる。

## Se 置換 PtBi<sub>2</sub> の大型単結晶育成： 極性–非極性構造相転移近傍の超伝導を研究する舞台 生島匠 工藤研究室（物理学専攻）

$MX_2$  ( $M$ : 遷移金属、 $X$ : ニクトゲンまたはカルコゲン) で表される化合物は、 $M$  の  $d$  バンドと  $X$  の  $p$  バンドのエネルギーと充填に依存して構造が変化する。Pt と Bi の組み合わせは絶妙であり、PtBi<sub>2</sub> は同じ化学組成のまま様々な結晶構造をとる。つまり、多形を示し、PtBi<sub>2</sub> の構造には不安定性を期待することができる。実際に、PtBi<sub>2</sub> の多形の 1 つである極性相では、Bi サイトの Se/Te 部分置換を行うことで、極性–非極性構造相転移を誘起することができる [1]。非極性相に転移すると、超伝導転移温度が 0.6 K から 2.4 K へと大幅に上昇する [1]。さらに、系が極性相と非極性相の相境界に近づくにつれて、転移温度が上昇する [1]。このとき、どのようなメカニズムで転移温度が上昇しているかを明らかにすることは、新たな超伝導増強因子につながるため、重要である。そこで、組成を広範囲に変化させた単結晶試料が不可欠となる。本研究では、Se で部分置換した Pt(Bi<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub>)<sub>2</sub> の大型単結晶育成を行った。この系における結晶育成の条件は単純ではなく、組成が変わると大きく変わる。 $x$  の範囲に応じて条件を最適化することで、純良かつ大型の単結晶試料を得ることに成功した。例えば、相境界付近の大型単結晶試料を両相について得ることができた。育成した大型単結晶試料を使用して、これまでに、 $\mu$ SR、ARPES、STM、EXAFS の実験を行った。現在、データの解析が進められているところであり、非極性相における超伝導転移温度の上昇と密接に関係すると考えられる特徴的なバンド構造が見出されている [2]。

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

[2] Y. Morita, T. Ikushima *et al.*, submitted.

## 配位多面体の連結で構成される遷移金属化合物の新超伝導体開発 上本 凜太郎 工藤研究室（物理学専攻）

$d^8$  遷移金属 Pt は、四面体、八面体、四角錐、平面四角形など様々な配位多面体を形成する [1]。 $p$  ブロック元素 Ge は価電子数が少ないために、電子の不足数に応じて多彩な共有結合のネットワークを示す。本研究では、これらの元素特性を利用して Pt と Ge の配位多面体を有する新超伝導体の開発を行なった。その結果、Pt と Ge の組成比が異なる 3 つの新物質を発見した。1 つ目の新物質は、Pt の周りに Ge が 4 配位した四面体と、Pt の周りに Ge が 5 配位した正四角錐が三次元的に連結した構造を持つ。この物質は、転移温度  $T_c = 6$  K の超伝導を示した。化学組成分析と磁化測定の結果から、Pt と Ge の組成比に幅があり、限られた範囲の組成比においてバルク超伝導が発現していることが明らかになった。一方で、単結晶 X 線構造解析によって得られた構造パラメータは、組成比に対して単調な変化を示した。2 つ目の新物質は、1 つ目の新物質の構造を歪ませた派生構造を持つ。 $T_c = 0.9$  K の超伝導を示した。3 つ目の新物質は、1 つ目の新物質とは異なる配位多面体の配列を持つ。 $T_c = 2$  K の超伝導を示した。本研究において発見した新物質は、組成比に応じて結晶構造と超伝導特性が大きく変化する。結晶構造と超伝導の関係を調べるための興味深い舞台である。

[1] Ulrich Muller, Inorganic Structural Chemistry, John Wiley & Sons (2007).

## パイライト関連構造を持つ熱電物質開発と測定装置作製

田邊俊樹 工藤研究室（物理学専攻）

熱電物質を用いると、温度差を電位差に変換することができ、排熱から電気を取り出すことが可能となる。熱電変換の性能は、発電可能な電力を示す出力因子  $PF = S^2/r$  と、発電効率を示す無次元性能指数  $ZT = S^2T/rk$  で評価される。ここで、 $S$  はゼーベック係数、 $r$  は電気抵抗率、 $k$  は熱伝導率である。大きな  $PF$  を得るには大きな  $S$  と小さな  $r$  の両立が必要だが、普通の金属では実現できない。さらに、大きな  $ZT$  を得るには熱伝導率を低減する必要があるが、電荷キャリアの伝導を抑制せずにフォノンの熱伝導率を抑制することは、一般に難しい。本研究では、熱電測定装置の作製と、パイライト関連物質の結晶構造およびバンド構造を利用した熱電物質開発を行った。

無冷媒冷凍機を用いて熱電特性を評価するために、サンプルホルダを CAD で設計し、工作センターで作製した。さらに、熱電物質の開発を行い、自作の装置でゼーベック係数を測定した。今のところ定性的な評価ではあるが、化学置換により  $PF$  が増加する傾向を見出すことができた。興味深いことに、 $PF$  は温度の上昇とともに大きくなっていく。

## 層状 Bi 化合物における化学置換による超伝導転移温度の上昇

中島 海斗 工藤研究室(物理学専攻)

$MX_2$  ( $M$ =遷移金属、 $X$ =ニクトゲン、カルコゲン)では、 $M$ の  $d$  および  $X$  の  $p$  のエネルギーとフィリングに応じて様々な結晶構造が形成される[1]。したがって、化学置換による結晶構造への影響が大きい。本研究では、多形を示す  $PdBi_2$  に着目した。低温低対称相の  $PdBi_2$  は転移温度  $T_c = 1.7$  K の超伝導を示す[2]。この物質では、表面状態に起因するディラック型バンド分散やラシュバ分裂したバンド構造が示唆されている[3,4]。多形を示すこの系では、構造不安定性が期待される一方で、物質合成は容易ではない。本研究では、試料合成条件の最適化および単結晶育成を行い、低対称相に化学置換を行うと  $T_c$  が上昇することを明らかにした。単結晶 X 線構造解析を行った結果、低対称相の構造を維持したまま  $T_c$  が上昇していることが分かった。この系はトポロジカル超伝導体の候補物質と考えられており、 $T_c$  の上昇はその超伝導特性を研究する上で重要である。

- [1] S. Jobic *et al.*, J. Alloys Compd. **178**, 253 (1992).
- [2] N. N. Zhuravlev, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **32**, 1305 (1957).
- [3] K. Dimitri *et al.*, Phys. Rev. B **97**, 144514 (2018).
- [4] H. Choi *et al.*, Phys. Rev. Materials **1**, 034201 (2017).

## 新規低次元構造を持つ超伝導体の開発 野村 健人 工藤研究室 (物理学専攻)

超伝導は結晶構造と密接な関係を持つ。例えば、空間反転対称性の破れによるスピン軌道相互作用とパリティ混成の効果は、新奇な超伝導状態をもたらす[1]。あるいは、結晶構造の対称性から複数の超伝導状態が混成すると、時間反転対称性を破る非従来型超伝導状態が導かれる。

本研究では元素の組み合わせを詳細に検討することで、新規の結晶構造をもつ新超伝導体の探索を行った。様々な条件で物質合成を行うことで、5種類の新物質を見出すことができた。磁化測定を行った結果、そのうちの2つが超伝導体であることがわかった。これらの物質は、複数種類の配位多面体からなる。針状の単結晶が得られることから、1次元的な性質を持つ可能性が示唆される。今後、超伝導状態を詳しく調べることで、新たな非従来型超伝導状態を観測できる可能性がある。

[1] M. H. Fischer, M. Sigrist, D. F. Agterberg, Y. Yanase, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. 14, 153 (2023).

## 新奇超伝導状態の探索に向けた Pt ニクタイド超伝導物質開発 平岡 耀登 工藤研究室 (物理学専攻)

白金ニクタイド化合物  $AEPtPn$  ( $AE$ : アルカリ土類金属、 $Pn$ : ニクトゲン) は、ハニカムネットワークを利用した超伝導研究の魅力的な舞台を与えてくれる。例えば、KZnAs型 SrPtAs ( $P6_3/mmc$ ,  $D_{6h}^4$ , No. 194)、SrPtSb型 BaPtSb ( $P\bar{6}m2$ ,  $D_{3h}^1$ , No. 187) は、秩序型  $PtPn$  ハニカムネットワークを持つ超伝導体である[1,2]。これらの化合物では、カイラル  $d$  波超伝導[3]やパリティ混成超伝導[4]などの非従来型超伝導の発現が理論的に予測され、実際に、 $\mu$ SR 実験[5,6]によってカイラル  $d$  波超伝導の発現が示唆された。重要な点は、ハニカムネットワーク、空間反転対称性の破れ、スピン軌道相互作用である。そこで本研究では、それらの効果を期待することができる BaPtAs、BaPtSb に着目して、新奇超伝導状態を探索するための純良試料合成を行った。BaPtAs は多形を示すため、狙いの相を得ることが難しい系である[7]。BaPtSb では、高温で組成がズレやすく、不純物が析出しやすいという難しさがある。本研究では、仕込み組成、ガス雰囲気、圧力、温度、加熱時間、冷却方法について、条件を系統的に変化させることで、合成条件の最適化に成功した。1月末に  $\mu$ SR 実験を行い、超伝導状態を詳しく調べる予定である。さらに、新しい候補物質の開発を行い、新超伝導体を発見した。

- [1] Y. Nishikubo *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 055002 (2011).
- [2] K. Kudo *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 063702 (2018).
- [3] M. H. Fischer *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 020509(R) (2014).
- [4] J. Goryo *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 100507(R) (2012).
- [5] P. K. Biswas *et al.*, Phys. Rev. B **87**, 180503(R) (2013).
- [6] T. Adachi *et al.*, Phys. Rev. B **111**, L100508 (2025).
- [7] K. Kudo *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 073708 (2018).

## 光子-スピン量子状態変換の高効率化に向けたブルズアイ光学共振器 中のゲート制御横型 GaAs 量子ドットの作製と評価 佐藤 穂有 大岩研究室（物理学専攻）

半導体におけるゲート制御横型量子ドット内のスピン量子ビットは、集積性の高さや電気制御性の高さ等から量子計算機の候補として有力視されている。また、量子テレポーテーションの原理を用いて、遠く離れた計算機同士を相互接続することで、演算能力の向上や秘匿な量子通信を可能とする長距離量子ネットワークの実現も期待されている。その原理としてもつれ光子対の各光子を2地点のノードにそれぞれ伝送し、量子ドット中の光吸収によって電子-正孔対が生成され、入射光子の偏光状態がコヒーレントに量子ドットのスピン状態へ転写される。しかし、現状としては半導体ゲート制御横型量子ドットの量子状態転写の成功確率は低い。その理由の一つとして、量子井戸層の厚さが15nm程度しかなく光吸収効率が低いためである。そこで、本研究では、同心円状回折格子に基づくブルズアイ光学共振器と量子ドットの複合構造により、偏光無依存な増大を達成するため、複合構造の実現を目的とする。ブルズアイ共振器の作製過程ではエッチングにより量子ドット内の電子を供給(排出)するための伝導チャネルが空間的に狭まってしまい、空乏化により電気伝導度が小さくなる。そのため、比較的キャリア密度の高い基板を用いた。本発表ではGaAsにおける作製とその低温電気伝導測定の結果を発表する。

## Si/SiGe 量子井戸基板を用いた中距離伝送デバイスの研究 中川元 大岩研究室（物理学専攻）

半導体量子ドットは量子コンピューター実現に向けた有望なプラットフォームである。とりわけ、Siを主原料とした基板は、核スピンによる影響がIII-V族半導体と比較して小さく、コヒーレンス時間が桁違いに長いという利点が存在している。

この10年間、Si量子ドット中のスピン状態に関する研究が数多く行われており、現在、産業装置を用いた大規模化が研究開発の中心となっている。その課題一つとして、100nm内で隣接する高密度集積された量子ドット列への配線は困難であり、量子ドット間の結合を維持しつつ、配線を可能にするデバイス構造が必要になっている。

この課題を解決するためには、 $\mu\text{m}$ 単位で離れた位置にある量子ドット間をつなぐ「中距離伝送」機能を備えた構造が必要とされている。実験的には、10 $\mu\text{m}$ 以上の距離を99.5%を超える忠実度で伝送した研究も報告されている。

しかし、Si結晶の対称性に起因するvalley準位やマイクロマグネットによる磁場勾配などに基づく、伝送過程における電子スピンの緩和機構は依然として十分に解明されておらず、その体系化は中距離伝送技術の長距離化・高速化・高忠実度化に不可欠である。

本研究では、Si/SiGe量子井戸基板を用いた中距離伝送デバイス開発の立ち上げとして、基板特性の評価およびファブリケーション工程の確立を目的としたHallbarデバイスの作製・測定を行った。

## ダイヤモンド色中心の発光取り出し効率向上のための 放物面反射鏡に関する研究

小林歩夢 大岩研究室（物理学専攻）

窒素-空孔中心（NV 中心）に代表されるようなダイヤモンド結晶中の色中心は、長いスピンコヒーレンス時間を持つことなどから量子通信ノードへの応用研究が進められている。また、ダイヤモンドの力学的・化学的安定性などから、量子センシングへの応用も期待されている。

こういった応用物は色中心の発光を利用するものである。しかし、ダイヤモンドは高い屈折率を持つため、色中心の発光を基板から取り出す効率が屈折・反射により制限される。本研究では、この発光取り出し効率を向上させるための、ダイヤモンド表面の放物面反射鏡構造の微細加工とその光学測定を行った。

微細加工には誘導結合プラズマ（ICP）を用いたプロセスを採用し、熱リフローにより形成したレジストの放物面形状を、ハードマスクを介してダイヤモンドに ICP エッチングを用いて転写した。

$\text{SiO}_2$  ハードマスクを用いた実験では、エッチング中のマイクロマスク再付着による表面粗化が課題となつたが、条件の異なるエッチングを交互に行う平滑化法により、表面粗さを大幅に改善した。一方で、作製した構造内部の NV 中心の発光消失が確認され、構造作製後の色中心導入の必要性が示唆された。今後は ICP プロセスで作製した構造での発光取り出し効率やプロセスによる色中心へのダメージの測定などが課題となる。

## 不均一弾性体理論に基づくフォノンの解析と超伝導に対する影響

齊木ゆきの 浅野研究室（物理学専攻）

弾性定数が空間的に均一でない弾性体では、フォノンの軟化により均一系に比べてフォノンの状態密度が増加し、ボゾンピークと呼ばれる構造が生じる。ハイエントロピー金属やアモルファス金属のような系では、縦波音響フォノンの状態密度がこの変更を受け、それが超伝導転移温度に影響すると予想される。

本研究では、弾性定数が空間的に均一でない Debye モデルにコヒーレントポテンシャル近似を適用し、縦波音響フォノンのグリーン関数と状態密度を数値計算した。さらに縦波音響フォノンが電子と結合した系を、線形化された Eliashberg 方程式で扱い、弾性定数の空間的不均一性が超伝導転移温度に及ぼす影響を評価した。

不均一系では縦波音響フォノンの自己エネルギーの実部が Debye 振動数より少し低振動数側で正、高振動数側では負となり、それぞれの領域はフォノンの軟化および硬化に対応する。また、自己エネルギーの虚部は、実部が符号反転するあたりの振動数で正のピーク構造（フォノンの散乱の増大）を示す。この変化に対応して、フォノンの状態密度  $g(\omega)$  は均一系のものからずれ、特にフォノンが軟化する振動数領域では増強されて、均一系からの増強率を表す  $g(\omega)/\omega^2$  が極大（ボゾンピーク）を示す。このピークは不均一性の増大とともに低振動数側へシフトし、ピークの幅も増大する。

さらに、上記のフォノンの変化が超伝導転移温度に与える影響を調べた。本研究では不均一性の導入によるフォノンの状態密度（Eliashberg 関数）の変化が転移温度に与える影響だけを考慮したため、フォノンの状態密度の増大が転移温度を上昇させるという結果を得た。

## 質量のある2次元 Dirac 電子系の励起子と励起子分子の解析

橋詰 宗一郎 浅野研究室 (物理学専攻)

電子と正孔が共に放物線型バンドを持つ系で Wannier 型励起子を考えると、これは水素原子に等価となり、励起子のエネルギー分散は電子と正孔の重心質量で決まる放物線型になる。しかし、バンドが非放物線性を持つと、励起子のエネルギー分散（重心運動）が自明でなくなり、この変化は励起子二個から成る励起子分子の形成にも影響を与える。

本研究では、AB 非対称ハニカム格子系を念頭に置き、質量のある2次元 Dirac 電子系における励起子と励起子分子を数値的に考察した。この系では、電子と正孔のエネルギー bandwidth が双曲線型になり、同時に相互作用ポテンシャルが構造因子によって補正される。この系を特徴づける結合定数は、光速を大きな波数を持つ電子の速度、真空誘電率を系の背景誘電率に置換した有効微細構造定数  $\alpha$  で与えられ、 $\alpha$  をゼロから無限大まで変えることは、電子と正孔のバンドを放物線型から極端な双曲線型へ連続的に変えることに対応する。

まず、重心運動量ゼロの励起子のエネルギーを求め、その束縛エネルギーが  $\alpha$  の増加関数であり、 $\alpha \sim 1.3$  でバンドギャップに達して励起子の自発的形成による不安定性が生じることを示した。また、重心運動量を変化させつつ励起子のエネルギーを求めて、励起子のエネルギー分散を得た。その結果、励起子の束縛エネルギーが重心運動量の関数として増大し、 $\alpha$  が大きいほど励起子の質量が重くなることがわかった。さらに、この励起子に対する計算結果を基に、Shiau ら[1]が開発した励起子基底法を用いて励起子分子の束縛エネルギーを計算した。その結果、励起子の質量増大と、励起子間相互作用の増強により、 $\alpha$  が大きい程励起子分子の束縛エネルギーが増大することが明らかになった。

[1] S.-Y. Shiau, M. Combescot, and Y.-C. Chang, Annals of Physics 336, 309 (2013)

## アモルファス FeSn におけるスピントransport 特性の評価

小野 由喜 新見研究室 (物理学専攻)

正三角形が頂点を共有して連なる二次元カゴメ格子構造では、その幾何学的な性質に由来する特異な電子構造を備えるため、この構造を持つ磁性体において近年精力的に研究が進められている。カゴメワイル強磁性体  $\text{Fe}_3\text{Sn}$  では、バンド構造内のディラックコーンに由来するベリー曲率によって、異常ホール効果や異常ネルンスト効果での巨大な信号が観測されている[1, 2]。一方で、波数  $k$  で定義される長距離秩序を持たないアモルファス FeSn では、カゴメ格子構造を持つ FeSn 合金系と同等かそれ以上の大きさの異常ホール伝導度や異常ネルンスト伝導度が報告された[3]。先行研究において、アモルファス FeSn でのこのような輸送特性は、アモルファス FeSn 内に短距離秩序として存在する部分的なカゴメ格子サイトに由来すると考察された。

本研究では、アモルファス FeSn の短距離秩序がスピントransport 特性としてどのように反映されるか測定し、アモルファス物質の輸送現象について新たな知見を得ることを目的とした。微細加工プロセスによって作製した非局所スピントransport 素子を用いて、スピントransport 測定や逆スピントホール効果測定を行いスピントransport 特性の評価を試みた。さらに、正確な輸送特性の評価を目指してデバイス作製プロセスを見直し、3 次元有限要素法による計算を用いた測定信号の評価を行ったため、これらの取り組みについて報告する。

[1] B. P. Belbase *et al.*, Phys. Rev. B **108**, 075164 (2023).

[2] T. Chen *et al.*, Sci. Adv. **8**, eabk1480 (2022).

[3] K. Fujiwara *et al.*, Nat. Commun. **14**, 3399 (2023).

## 全固体イオングート法を用いたファンデルワールス層状物質の物性変調 岸木 克将 新見研究室（物理学専攻）

物性の大半はキャリア数によって決まるため、物性制御の最も有効な手法はキャリア数変調である。ゲート電圧による Li インターカレーション法は、試料隙間への Li イオン注入によりバルク全体のキャリア数制御を可能とする手法である。ファンデルワールス (vdW) ギャップという隙間をもつ vdW 層状物質は、層間がイオンの受け入れサイトとして機能するため、この手法を用いることで、物質全体のキャリア数ひいては物性を大幅に変調できる。従来の電界効果トランジスタよりも 1 枝から 2 枝大きいキャリア数変調が可能であるため、新奇物性発現につながる手法として期待されている。

本研究では、液体電解質に伴う取り扱い上の課題を解決するため、固体電解質を用いた全固体イオングート法による物性変調を試みた。対象として、vdW 層状 CDW 物質 2H-TaSe<sub>2</sub> および vdW 層状磁性体  $(Fe_{0.54}Co_{0.46})_5GeTe_2$  (FCGT) を用い、ゲート電圧印加に伴う輸送応答の変化を測定した。FCGT を用いたデバイスでは、ゲート誘起反強磁性－強磁性転移を観測したため、本発表ではその測定結果および解釈について報告する。

## Fe(Se,Te)/Fe(Se,Te)ジョセフソン接合における磁気輸送特性 田端佑伍 新見研究室(物理学専攻)

鉄系超伝導体 Fe(Se,Te)は、バルクの超伝導性に加えて、ディラック型のスピン分極した表面状態を併せ持つことから、トポロジカル超伝導体候補として、マヨラナ準粒子探索の魅力的なプラットフォームのひとつである[1]。また窒素空孔中心を利用したダイヤモンド量子センサや磁気光学カ一効果による測定では、本来競合関係にあるはずの強磁性秩序が、超伝導転移温度以下で共存している可能性が指摘されている[2][3]。さらに近年、Fe(Se,Te)フレークを積層させたファンデルワールスジョセフソン接合において、掃引する磁場方向に依存して磁気抵抗ヒステリシスが観測されたことにより[4]、強磁性秩序の存在が輸送測定で初めて示唆された。しかし、観測されたヒステリシスは「ピン留めされた磁束や過剰鉄組成」のような外因的要因でも生じ得ることが指摘されており、その起源は未だ明らかになっていない。

そこで本研究では、このヒステリシスの起源を調べるために、Fe(Se,Te)/Fe(Se,Te)ジョセフソン接合を作製し、磁気抵抗の温度および掃引磁場依存性を系統的に測定した。その結果、観測されたヒステリシスは、超伝導フレーク内部に侵入した磁束のピン留めによって定性的に説明できることが明らかになった。発表では、作製した素子構造や測定結果の詳細について報告する。

- [1] P. Zhang *et al.*, *Science* **360**, 182-186(2018).
- [2] C. Farhang *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **130**, 046702 (2023).
- [3] N. J. McLaughlin *et al.*, *Nano Lett.*, **21**, 7277-7283 (2023).
- [4] G. Qiu *et al.*, *Nat. Commun.* **14**, 6691 (2023).

## 電荷密度波転移に伴う音響電流の増大と対称性低下の研究

二階堂夏海 新見研究室（物理学専攻）

近年、表面弹性波(SAW)を用いた層状物質の物性変調・制御に関する研究が広く行われている[1,2]。SAW とは固体表面を伝わる歪みの波であり、圧電基板上の櫛形電極に高周波電場を入力して生成される。

電子-格子相互作用の強い低次元導体では、電子密度の周期的な変調である電荷密度波(CDW)転移が見られる。CDW は格子変形を伴うため、動的な格子変形である SAW との相互作用が期待されるものの、CDW 状態における電子と SAW の相互作用についての研究はこれまであまり行われてこなかった。そこで本研究では、擬一次元 CDW 物質  $\text{NbSe}_3$  および二次元 CDW 物質  $2\text{H-TaSe}_2$  を対象とした研究を行った。実験では CDW 状態における電子と SAW の相互作用を調べるために、対象薄膜をデバイスに組み込み、SAW を照射しながら各温度で音響電流を測定した。音響電流とは、金属や半導体に SAW を照射したときに電子格子相互作用によって生じる直流電流のことである[3]。その結果、 $\text{NbSe}_3$  薄膜および  $2\text{H-TaSe}_2$  薄膜どちらにおいても、CDW 転移以下での音響電流の特異なふるまいが観測されたため、本発表ではその詳細について報告する。

- [1] M. Yokoi *et al.*, *Sci. Adv.* **6**, eaba1377 (2020).
- [2] T. P. Lyons *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **131**, 196701 (2023).
- [3] K. A. Ingebrigtsen, *J. Appl. Phys.* **41**, 454 (1970).

## 螺旋磁性体 $\text{Cr}_{1/3}\text{TaS}_2$ における電気輸送特性 およびスピノン輸送特性

山田和輝 新見研究室（物理学専攻）

層状螺旋磁性体  $\text{Cr}_{1/3}MS_2$  ( $M = \text{遷移金属}$ ) は、ファンデルワールス層状物質である  $2H-MS_2$  の層間に挿入された Cr 原子の磁気モーメントが  $c$  軸方向に螺旋を巻いている物質群である。これまでに層状螺旋磁性体  $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$  を横型スピノンバルブ構造に組み込みスピノン輸送特性を測定した研究において、 $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$  の膜厚に依存してスピノン信号の振る舞いが変化することが報告されている[1]。しかし、 $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$  における螺旋構造の 1 周期は約 48 nm と長く、螺旋構造を 2 周期以上含む膜厚領域におけるスピノン輸送特性の測定はこれまで実現していない。

そこで本研究では、螺旋構造の 1 周期が約 22 nm である層状螺旋磁性体  $\text{Cr}_{1/3}\text{TaS}_2$  に着目した。バルクの  $\text{Cr}_{1/3}\text{TaS}_2$  を機械的剥離法を用いて薄膜化し、電気輸送特性を測定したところ、螺旋の巻き数が磁場によって変化することで磁気抵抗に複数の不連続な変化が観測された。さらに、 $\text{Cr}_{1/3}\text{TaS}_2$  を横型スピノンバルブ構造に組み込みスピノン輸送測定を行った結果、スピノン拡散長は約 2 nm と評価され、螺旋構造の 1 周期 (22 nm) に比べて十分短いことが分かった。このことから、スピノン流を用いて螺旋磁性体表面の磁気モーメントを選択的に検出できることが示唆される。

また、スピノン信号の磁場依存性から、 $\text{Cr}_{1/3}\text{TaS}_2$  の表面磁気モーメントの外部磁場に対する応答を検出できることが分かった。さらに、逆スピノンホール効果測定において、磁気転移温度付近で信号強度が最小値をとる特徴的な振る舞いが観測された。本発表では、これらの測定結果の詳細について報告する。

- [1] N. Jiang *et al.*, *Phys. Rev. B* **112**, L180402 (2025).

## gMLP における長時間学習ダイナミクスの統計力学解析

深見海斗 吉野研究室(物理学専攻)

深層学習は入力に対する高い表現能力を示す一方で内部表現がブラックボックスである。このブラックボックス性は、実応用で高精度を達成しているにもかかわらず、なぜそのように学習が進むのか、そもそも学習とはどのような事を言うのか、どのような内部状態が典型的なのかといった根源的な問い合わせ未解決のままにしている。

統計物理の立場では異なる初期条件で学習したレプリカ間の相関を秩序変数として学習ダイナミクスを解析する。本研究では Attention を持たず解析しやすい gMLP に注目し、実データで長時間学習ダイナミクスが現れるかを検証する。画像では MNIST の分類およびノイズ除去、言語では WikiText から抽出したサブセットをデータセットとし、文脈付きのトークン列に対するマスク予測 (MLM) タスクで学習する。異なる初期条件で学習した複数の gMLP を並列に訓練し、各層のレプリカ相関  $q_{inv}$  の時間発展と層間の空間的不均一性を測定する。さらに MLP との比較により gMLP のゲーティング機構と非 Attention 構造が相関形成に与える影響を明らかにし、実データにおける典型的内部表現の存在とその起源を議論する。gMLP が高いオーバーラップを示す要因については、学習されたゲーティングの重み ( $W$ ) がデータ構造に応じた特定の重みパターンへ収束しやすく、単純な MLP よりもレプリカ間で内部表現だけでなく、その内部表現を規定する重み構造自体が類似化するためである可能性がある。ただし、これは現時点では仮説であり、重みの分布や相関の時間発展を定量的に比較することで検証する。

## キラル相互作用を持つアクティブマターにおける トポロジカル構造とダイナミクス

阿部翔太郎 非平衡物理研究室（名古屋大学大学院理学研究科物理学領域）

鏡映対称性を破るキラル相互作用は要素間にねじれを誘起し、渦や螺旋などのトポロジカル構造を形成する。量子系ではスピンが渦状配向をとる磁気スキルミオン[1]、古典系では類似の配向構造を示す半スキルミオン[2]が代表例である。さらに、生物のような自己駆動する粒子集団（アクティブマター）においても同様の構造が観測されている。しかし、アクティブマターでは、トポロジカル構造の形成機構およびダイナミクスを記述する理論的枠組みは十分には整備されていない。

そこで本研究では、キラル相互作用を組み込んだアクティブ粒子モデルを用いて、分子動力学シミュレーションを行った。その結果、先行研究[2]で報告された半スキルミオンの集団構造が、本モデルでも形成されることを確認した。さらに、自己駆動力が閾値を超えると、半スキルミオンが突如回転運動を開始するディピニング転移[3]が生じることを見いだした。また、半スキルミオンが三角格子状に配列し、回転方向のフラストレーションが生じる条件における回転秩序を調べた。その結果、隣接する渦における中心間距離依存の回転則[4]に基づく解析により、距離の変化を通じてフラストレーションが緩和され、ジグザグ秩序が形成されることを示した。本研究の結果は、磁気スキルミオンにおける外場駆動下のダイナミクスやアクティブ結晶における渦の回転秩序など、様々な系におけるトポロジカル構造の動的制御への理解に繋がり得る。

[1] N. Nagaosa and Y. Tokura, Nat. Nanotechnol. **8**, 899 (2013)

[2] K. Takae and T. Kawasaki, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **119**, e2118492119 (2022)

[3] C. Reichhardt and C. J. O. Reichardt, Rep. Prog. Phys. **80**, 026501 (2016)

[4] K. Beppu, Z. Izri, J. Gohya, K. Eto, M. Ichikawa and Y. T. Maeda, Soft Matter **13**, 5038 (2017)

## 菱面体積層グラフェンにおける非可換チャーンバンド

内田丈翔 越野研究室（物理学専攻）

本研究では、強相関トポロジカル物性の新たな舞台として注目されている菱面体積層グラフェンにおける相互作用駆動電子状態を理論的に研究した。二次元物質では低次元性により電子相関効果が顕著となり、特にフラットバンド系においては多彩な量子相が実現することが知られている。菱面体積層グラフェンは、モアレ超格子を必要とせずにフラットバンドと大きなベリー曲率を有する点で特徴的であり、近年、異常量子ホール効果や分数チャーン絶縁体の実験的観測が報告されている[1]。

こうした背景のもと、未解明な点が多く残されている充填率  $\nu = 2$  に着目し、自己無撞着ハートリー・フォック法を用いて基底状態の探索を行った。その結果、二重縮退したバンド構造を持ち、合計のチャーン数が 1 となる、これまでに報告のない新しい相互作用駆動基底状態を発見した[2]。本論文では、この二重縮退したトポロジカルバンドを非可換チャーンバンドと呼び、対応する電子状態を非可換状態と定義する。この状態では、縮退したバンド空間において SU(2) 行列値のベリー接続が現れ、ブリルアンゾーンを一周することで非可換な幾何学的位相を獲得する。これは、可換な U(1) チャーン数のみでは記述できない非可換的トポロジー構造の存在を示している。さらに、有効模型の構築と解析により、この二重縮退がスピン回転と半並進を組み合わせたノンシンモルフィック対称性によって保護されていることを明らかにした。

[1] Z. Lu, *et al.*, *Nature* **626**, 759-764 (2024).

[2] T. Uchida, T. Kawakami, and M. Koshino, arXiv:2508.07366 (2025).

## hBN 基板上グラフェンナノリボンにおける

### モアレ構造緩和と電子状態の理論

奥村涼介 越野研究室（物理学専攻）

近年、二次元物質を積層した際に生じるモアレ構造が電子物性に与える影響が注目されている。グラフェンを六方晶窒化ホウ素 (hBN) 上に積層した graphene/hBN ヘテロ構造では、長周期のモアレポテンシャルが生じ、電子物性に局所的な変化をもたらすことが知られている<sup>[1]</sup>。これは、サブ格子非対称性やわずかな格子不整合によるものである。従来の研究は主に二次元物質同士の積層系を対象してきたが、一次元構造と二次元基板を組み合わせた系でも新たなモアレ物性の発現が期待される。

GNR は有限幅を持ち、ジグザグ端に由来する局在エッジ状態を備えた典型的な一次元系である。GNR を hBN 基板上に置くと、基板との相互作用により一次元-二次元モアレ構造が形成される。従来の研究<sup>[2]</sup>では、基板上での滑動挙動や摩擦特性が調べられてきたが、静的構造緩和やモアレ構造が電子物性に与える影響は十分に理解されていない。

本研究では、まず連続体弾性理論に基づく有効格子模型を構築し、GNR/hBN 系の構造緩和とモアレドメインの形成を詳細に解析した。リボン幅や端部配置がもたらす局所的なねじれ・歪みの分布を評価し、さらに強束縛模型を用いて電子状態を計算した。その結果、モアレポテンシャルがジグザグエッジ状態に与える影響を明らかにし、GNR/hBN 系特有の一次元-二次元モアレ構造に伴う構造-電子相関の特徴を定量的に評価できた<sup>[3]</sup>。本研究は、一次元-二次元モアレ系における電子物性制御の理解に向けた基盤的知見を提供する。

[1] P. Moon and M. Koshino, *Phys. Rev. B* **90**, 155406 (2014).

[2] W. Ouyang, D. Mandelli, M. Urbakh, and O. Hod, *Nano Lett.* **18**, 6009 (2018).

[3] R. Okumura, N. Nakatsuji, T. Kawakami, and M. Koshino, arXiv:2510.21166 (2025).

## ツイスト WTe<sub>2</sub>における一次元モアレ構造と電子状態の理論

吉田大輝 越野研究室（物理学専攻）

ツイストされた二次元物質におけるモアレ超格子は、電子状態を制御する有力な手法として広く研究されている。一般に、同一の二次元物質からなる二層を小さなツイスト角で積層すると、基礎となる原子格子を拡大・回転させた二次元モアレパターンが形成される。一方、結晶構造に異方性をもつ二次元物質では、特定の比較的大きな回転角において、純粋な一次元的なモアレ超格子が形成されることが近年報告されている。とりわけ、ツイスト二層 WTe<sub>2</sub>においては一次元モアレ構造の形成が実験的に確認されている[1]。しかしながら、異方的な二次元物質における一次元モアレ出現の一般的な理解は未だ十分ではなく、また、このような一次元モアレ構造が本質的な一次元電子状態を生じさせるかどうかについても明確には分かっていない。

本研究では、WTe<sub>2</sub>を例として、異方的な二次元物質のツイスト二層系における一次元モアレ出現の一般的な枠組みを構築した。さらに、第一原理密度汎関数理論計算(DFT)により、ツイスト二層 WTe<sub>2</sub>の一次元モアレ超格子において、準一次元的な電子状態が形成されることを明らかにした。加えて、DFT から抽出したモアレポテンシャルを取り入れた有効的なタイトバインディングモデルを構築し、電子バンド構造および実空間波動関数の準一次元的な特徴を再現することに成功した。本研究の結果は、一次元モアレ構造と電子状態の関係に対する理解を深めるとともに、異方的二次元材料における低次元電子物性の設計指針を与えるものである。

[1] X.Yang, et al., ACS Nano 2025, 19, 13007–13015(2025)

**物理学専攻  
物性グループ  
会場：D407  
2月13日（金）**

## Fe(Se,Te)/FeTe 薄膜素子における超伝導ダイオード効果の Te 組成依存性 稻村健臣 松野研究室（物理学専攻）

11系鉄系超伝導体のひとつである Fe(Se,Te)は、鉄系の中で最も単純な結晶構造を持ち、低温まで超伝導以外の長距離秩序を示さないことから、超伝導の電子ネマティック機構を調べるモデル物質となっている。薄膜研究においては、単層化[2]、Te ドープ[3]、エピタキシャル歪の導入[4]による超伝導転移温度( $T_c$ )の向上が報告されており、鉄系の  $T_c$  高温化に関する重要な研究対象となっている。また、積層構造の反転対称性が破れた  $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}/\text{FeTe}$  薄膜の二層膜素子では、 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$  の強いスピン軌道相互作用(SOI)に由来した超伝導臨界電流密度( $J_c$ )の非相反効果である超伝導ダイオード効果 (SDE) が観測される[5]。本研究では、高い SDE 整流効率( $\eta$ )と  $J_c$  を示す Te 組成の最適化を目的として、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x/\text{FeTe}$  ( $x = 0.5, 0.6, 0.7$ ) 薄膜素子の作製と、そのスピン軌道相互作用及び超伝導臨界パラメータの評価に取り組んだ。

フォトリソグラフィ及びパルスレーザー堆積法により、20 nm  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ /20 nm  $\text{FeTe}$  ( $x = 0.5, 0.6, 0.7$ ) 薄膜積層構造をチャネルとした細線形状の素子を作成した。電気抵抗の温度依存性から、すべての素子において明瞭な超伝導転移を観測した。 $x = 0.5, 0.6, 0.7$  において、それぞれ  $T_c = 11.2, 13.4, 10.2$  K 及び  $J_c = 3.5 \times 10^5, 1.2 \times 10^6, 3.2 \times 10^5$  Acm<sup>-2</sup> (ゼロ磁場で温度 0.5  $T_c$ ) が得られ、超伝導臨界パラメータは  $x = 0.6$  で最大値を示した。これらの試料において SDE を評価した結果、 $\eta$  は  $x = 0.6$  において最大値を示すことを明らかにした。これは、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  系における SDE 効果の組成依存性を示した初めての報告であり[5]、本物質の高い  $J_c$  を活かした SDE 素子の設計指針となると期待される。

- [1] K. Ishida *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., **119**, e2110501119 (2022).
- [2] J. Shiogai *et al.*, Nature Phys. **12**, 42 (2016).
- [3] Y. Imai *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., **112**, 1937 (2015).
- [4] F. Nabeshima *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 020308 (2017). [5] Y. Kobayashi *et al.*, Commun. Phys. **8**, 196 (2025). [6] K. Inamura *et al.*, in preparation.

## 5d 電子系酸化物 $\text{CaIrO}_3$ 薄膜における電子輸送と電流-スピン流変換 越智 菖 松野研究室（物理学専攻）

近年、磁気デバイスにおける磁化制御の要素技術として強いスピン軌道相互作用に起因する電流-スピン流変換現象が注目を集めている。 $5d$  遷移金属酸化物は、強いスピン軌道相互作用を持つ  $5d$  電子のみがフェルミ準位を支配することから、電流-スピン流変換現象の理解に向けた重要な物質群である。中でも Ir 酸化物  $\text{SrIrO}_3$ (SIO)においては高い電流-スピン流変換効率が報告されている[1]。一方、 $\text{CaIrO}_3$ (CIO)は電子相関の強いディラック半金属であり[2]、電子輸送特性が温度や電界によって敏感に変化する。本研究では、このように特異な電子構造を有する CIO の薄膜を作製し、電子輸送特性および電流-スピン流変換現象の観測を行った。CIO 薄膜はパルスレーザー堆積法を用いて LSAT(001)基板上に作製し、X 線回折により(001)配向のエピタキシャル成長を確認した。膜厚 35 nm の CIO 薄膜を用いた電子輸送測定から、10 K から 300 K の昇温過程においてホール係数の符号が正から負に変化することが明らかになった。このようなホール係数の強い温度依存性は、CIO 薄膜の先行研究に一致している[3]。次に CIO 上に強磁性金属  $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$ (CoFeB)を成膜し、二層膜構造 CoFeB /CIO を作製した。二層膜構造における CIO の膜厚は 17, 19, 24 nm とした。電流 - スピン流変換を観測するため、二層膜をホールバー型デバイスに加工し、高調波ホール測定から 2 倍波ホール抵抗の磁場印加角度依存性を得た。CIO の電流-スピン流変換効率は、17–24 nm の範囲で +0.35 – 0.50 を示し、既報研究の SIO と同程度であった[1]。この結果は CIO がスピントロニクス材料として有用であることを示すとともに、特異な電子構造におけるスピン流生成現象の理解に向けた基盤となる成果である。

## **La<sub>2/3</sub>Sr<sub>1/3</sub>MnO<sub>3</sub> メンブレンにおける面内自由度の制御と 磁気特性及び磁気伝導特性の評価**

神田 洸太 松野研究室 (物理学専攻)

機械的剥離法によって得られる層状物質の小片試料（自立型フレーク）では、曲げ構造やツイスト接合など、面内自由度が制御された試料構造が実現され、従来の薄膜技術では困難な物性が数多く観測されてきた。近年、エピタキシャルリフトオフ法[1]の技術向上により、三次元的な共有結合やイオン結合を含む物質においても、基板から剥離した自立型メンブレン（膜厚が数~数十ナノメートルの二次元シート）が実現され、同様の面内自由度の制御が可能となった。本研究では、室温強磁性でありハーフメタル性を有するペロブスカイト型酸化物 La<sub>2/3</sub>Sr<sub>1/3</sub>MnO<sub>3</sub> の自立型メンブレンの可能性に着目した。ペロブスカイト型酸化物と格子整合性が良い Sr<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub> を犠牲層としたエピタキシャルリフトオフ法[2]を用いて、La<sub>2/3</sub>Sr<sub>1/3</sub>MnO<sub>3</sub> の自立型メンブレンを作製し、面内変調歪みの印加やツイスト接合の作製を試みた。

La<sub>2/3</sub>Sr<sub>1/3</sub>MnO<sub>3</sub> メンブレンへの歪印加実験では、剥離過程の直前に Pt (100 nm)/Ti (5 nm) を堆積することで、La<sub>2/3</sub>Sr<sub>1/3</sub>MnO<sub>3</sub> メンブレンにリップル形状を印加することに成功した。自立型メンブレンはバルクに近い 370 K の強磁性転移温度( $T_c$ )を示すのに対し、リップル歪を受けたメンブレンでは  $T_c = 270$  K と大きく減少した。ラマン分光及びカーボン微鏡による解析から、微視的な面内の歪勾配が  $T_c$  変調の起源であることを明らかにした[3]。ツイスト接合の研究では、二枚の La<sub>2/3</sub>Sr<sub>1/3</sub>MnO<sub>3</sub> メンブレンを相対回転させて転写し、接合構造を作製した。電流電圧測定から、トンネル伝導が支配的になっていることが分かり、磁気伝導測定から、磁気抵抗比約 20%程度のトンネル磁気抵抗効果及び、トンネル異方性磁気抵抗効果の観測に成功した[4]。本成果は、酸化物メンブレンによる磁気トンネル接合を実証した初めての報告である。

## **4d 遷移金属酸化物 MoO<sub>2</sub> 薄膜成長とスピントルクの観測**

高藤 大悟 松野研究室 (物理学専攻)

非磁性層と磁性層から成る二層膜構造において、スピントルクは、磁気デバイスにおける磁化制御を実現する上で重要な物理機構の一つである。スピントルクは、非磁性層における強いスピントルク相互作用 (SOC) に起因する電流-スピントルク変換現象により生成され、これまで 5d 遷移金属が広く用いられてきた。近年、ルチル構造を持つ 5d 遷移金属酸化物において結晶対称性に起因するスピントルク生成が報告されており、結晶構造がスピントルク生成に与える影響が注目を集めている [1]。一方で、その生成機構における SOC の役割については、未だ十分に理解されていない。結晶構造の影響を議論するためには、エピタキシャル酸化物薄膜を用いたスピントルクの定量評価が重要である。本研究では 5d 電子系と比べて SOC の寄与が比較的小さい 4d 電子系酸化物に着目し、ルチル構造を持つ 4d 遷移金属モリブデン酸化物 MoO<sub>2</sub> を対象として、エピタキシャル薄膜合成とスピントルクの観測を行った。MoO<sub>2</sub> 薄膜は、既報研究と同様の手法で、反応性スパッタ法を用いてサファイア Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001) 基板上に成長させた [2]。X 線回折法によりエピタキシャル MoO<sub>2</sub>(010) 薄膜の形成が確認され、X 線光電子分光法から 4d<sup>2</sup> 電子状態 (Mo<sup>4+</sup>) が明らかになった。次に MoO<sub>2</sub> 薄膜上に強磁性金属 Co<sub>20</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>20</sub> を成膜し、ホールバー型デバイスに加工した。スピントルクの評価には、外部磁場中における二倍波ホール抵抗測定を用い、その外部磁場依存性からスピントルク生成効率  $\xi_{DL}$  を評価した。MoO<sub>2</sub> は  $\xi_{DL} = +0.039$  を示し、参照試料 4d 遷移金属 Mo の  $\xi_{DL} = -0.0041$  と比べ、絶対値で約 10 倍の値を持つことが明らかになった。本研究は、新たなスピントロニクス材料の開拓に貢献するとともに、結晶構造がスピントルク生成に与える影響を検討する基盤を与える成果である。[1] M. Patton *et al.*, Adv. Mater. **35**, 2301608 (2023). [2] K. Fujiwara *et al.*, J. Appl. Phys. **125**, 085301 (2019).

## LaNiO<sub>3</sub>/LaTiO<sub>3</sub> 人工積層膜の作製と輸送特性の評価

田中 智遍 松野研究室(物理学専攻)

ペロブスカイト型希土類ニッケル酸化物 ( $R\text{NiO}_3$ ) は希土類元素  $R$  のイオン半径に応じて金属絶縁体転移や反強磁性転移を示すことが知られている。その中でも LaNiO<sub>3</sub> (LNO) は唯一全温度域において常磁性金属である。近年、類縁物質である層状 La<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub>O<sub>7</sub> において超伝導が報告され、結晶構造の次元性の違いが電子相に大きな影響を与えることが示されている。本研究では、層数や界面を制御することで有効な次元性を調整可能な人工構造に着目し、LNO と LaTiO<sub>3</sub> (LTO) を組み合わせた人工積層膜を作製し、その構造および輸送特性を評価した。LNO と LTO との界面では、 $\text{Ni}^{3+} + \text{Ti}^{3+} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + \text{Ti}^{4+}$  の電荷移動に伴う Ni 層への電子ドープが期待される。LTO よりも電荷移動が抑制されると考えられる SrTiO<sub>3</sub> (STO) 層を用いた LNO/STO 積層膜と比較することで、電子ドープによる影響について検討する。

試料はパルスレーザー堆積法を用いて LSAT(001) 基板上に成膜した。設計積層単位は [LTO(1 u.c.), LNO( $m$  u.c.)] ( $m = 2-6$ ) および [STO(1 u.c.), LNO( $n$  u.c.)] ( $n = 2-6$ ) で、成膜時の基板温度は 550°C–600°C、酸素分圧は LNO 層・STO 層で 0.19–0.40 Torr、LTO 層で  $10^{-7}$  Torr とした。各層の成膜レートは単膜試料の評価に基づいて決定し、レーザーのパルス数により層数を制御した。XRD では、いずれの人工積層膜においても良好な膜質に起因するフリンジ構造が観測された一方で、超格子ピークは LNO/STO でのみ観測された。散乱因子の層間コントラストと界面ラフネスの違いという二つの要因が考えられる。LNO/LTO 人工積層膜は、室温付近で金属的輸送が期待される典型値を大きく上回る電気抵抗率を示し、温度依存性も絶縁体的であった。これは LNO/STO 人工積層膜の金属的挙動とは異なっており、界面における電荷移動の程度および界面ラフネスの違いが、複合的に輸送特性に影響している可能性がある。

[1] H. Sun *et al.*, Nature **621**, 493 (2023). [2] E. K. Ko *et al.*, Nature **638**, 935 (2025).

## エピタキシャル SrCrO<sub>3</sub> 薄膜成長と反強磁性金属特性の探索

吉田 航 松野研究室 (物理学専攻)

近年、反強磁性的スピニン秩序と特異な結晶対称性との共存により、強磁性的なスピニン依存輸送特性を示す交替磁性体が注目されている。中でも、GdFeO<sub>3</sub> 型歪みを伴うペロブスカイトにおいて交替磁性の可能性が理論的に指摘されている[1]。SrCrO<sub>3</sub> は、バルクでは立方晶ペロブスカイト構造を有する反強磁性体であり[2]、金属的特性が示唆されているものの、バルク試料では粒界の影響が大きく金属的な電気伝導特性は確認されていない。一方で、エピタキシャル SrCrO<sub>3</sub> 薄膜においては金属的伝導が報告されているが[3]、磁性について検討した報告はない。本研究では、パルスレーザー堆積法による SrCrO<sub>3</sub> 薄膜の成膜条件を最適化し、電気測定、磁化測定、および磁気輸送特性を通じて SrCrO<sub>3</sub> 薄膜の反強磁性金属状態を検討した。

始めに、LSAT(001) 基板上に、成膜時の酸素分圧を変化させてエピタキシャル薄膜を作製した。成膜直後には酸素欠損した SrCrO<sub>3- $\delta$</sub>  が堆積しており、アニール処理によりペロブスカイト型 SrCrO<sub>3</sub> へと変化することが X 線回折により確認された。室温での電気抵抗率を指標として、酸素分圧を  $5.0 \times 10^{-5}$  Torr と最適化した。次に、膜厚を変化させた SrCrO<sub>3</sub> 薄膜に対して電気抵抗率の温度依存性を測定した結果、膜厚 17 nm の試料では金属的な温度依存性が観測された。X 線回折による結晶性と格子定数から考えると、粒界が抑制されたコヒーレント成長が実現していることが示唆され、本質的な金属伝導が反映されていると考えられる。さらに、金属的挙動を示す薄膜において磁気秩序の存在を示唆する磁気抵抗の特徴が観測された。

[1] M. Naka *et al.*, Phys. Rev. B **103**, 125114 (2021). [2] L. O.-S.-Martin *et al.*, Phys. Rev. Lett. **99**, 255701 (2007). [3] K. H. L. Zhang *et al.*, Nat. Commun. **5**, 4669 (2014).

## **Yb/Si(111)表面の作製と電子状態観測**

市川龍 木村研究室（物理学専攻）

二次元重い電子系では、次元性の低下に伴う量子閉じ込めや磁気ゆらぎなどにより、多彩な物性を発現する可能性を秘めている。我々はこれまでに、金属単結晶 Cu(111)上の單原子層近藤格子 YbCu<sub>2</sub>において、完全二次元の重い電子状態が出現することを見出した[1]。従来用いた基板は金属の Cu であり、基板由来の電気伝導度が大きいため、薄膜自身のマクロな電気伝導度測定が困難である。そこで基板を半導体や絶縁体にすることが求められる。半導体基板上における希土類元素薄膜の数少ない作製例として、Yb/Si(111)が挙げられる[2]。そこで本研究では、半導体基板上の希土類金属間化合物を作製する前段階として、Yb を半導体 Si(111) に吸着させた場合のミクロな状態変化を調べる目的で、RHEED、LEED および ARPES を用いて、成膜過程及び成膜後の表面構造、薄膜の電子状態の作製条件による変化を観測したので報告する。

表面構造は Yb 蒸着中及び蒸着後の基板加熱温度を変えることによって、既に報告があつた Si(111)- (3×1)、(2×2) の表面再構成が再現することを確認した[2]。さらに、常温で Yb 蒸着後、基板温度 400°C に加熱したところ、これまで報告がなかつた Si(111) 上の Yb-Si 化合物だと考えられる ( $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ )R30° の表面再構成を得た。また Yb の電子状態は、3×1 表面で二価と三価の混合原子価、2×2 表面は二価が多いことが分かった。一方で、( $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ )R30° 表面では二価が多いが、Yb4f<sub>7/2</sub> の結合エネルギーは約 0.1 eV で、フェルミ準位に近接し、重い電子的な電子状態になっていることが分かった。以上の結果は、Yb 被覆率に応じて、4f 準位のエネルギー位置、すなわち物性の制御が可能であることを示唆する。

[1] T. Nakamura *et al.*, Nat. Commun. **14**, 7850 (2023). [2] C. Wigren *et al.*, Phys. Rev. B **48**, 11014 (1993).

## **一軸圧力下での交替磁性体 MnTe の電子状態変化の観測**

諏訪 宏直 木村研（物理学専攻）

近年第3の磁性体として提唱された「交替磁性体」は、正味の磁化はゼロであるが、結晶内の反平行スピンを持つ副格子同士が、通常の並進や空間反転ではなく、回転操作によって結びつくという特定の結晶対称性により、運動量空間で時間反転対称性の破れによるスピン分裂を示す。交替磁性体の代表的な候補物質である MnTe は、ネール温度 (= 307 K) 以下で各 Mn 層内のスピンが整列し、かつ隣り合う Mn 層のスピン同士が反転している。MnTe のスピン分裂は一軸圧力によって増大することが理論的に予測されている[1]が、実験的な検証はなされていない。MnTe の光学伝導度スペクトルでは 70 meV 近傍にピーク構造が観測されるが、これは交替磁性によって生じたスピン分裂に由来すると考えられる。そこで本研究では、このピークの一軸圧依存性からスピン分裂バンドによる電子状態の微細な変化を調べるために、汎用の光学測定用クライオスタットに取り付け可能で、可逆的かつ精密な負の一軸圧力を容易に印加できる「一軸圧力セル」を独自開発し、実験を行なった。歪みゲージを用いて一軸歪みの大きさを測定したところ、圧力印加によって約 0.8 % の引張歪みを加えられることを確認した。その後 THz 顕微 FTIR 測定系を用いて一軸圧下での THz 光反射スペクトルの測定によって光学伝導度スペクトルの温度・一軸圧依存性を調査した。その結果、低温 (10 K, 100 K)において 70 meV 近傍のピーク強度が負の一軸圧力に対して系統的に減少する様子を観測した。この結果は、MnTe のスピン分裂幅が負の一軸圧力で小さくなることを示している。

[1] K. D. Belashchenko, Phys. Rev. Lett. **134**, 086701 (2025).

## 非中心対称磁性 Weyl 半金属 CeAlSi の赤外分光研究

Pan Yue 木村研究室 (物理学専攻)

近年、反転対称性を欠く非中心対称結晶構造に磁性が加わった磁性ワイル半金属が提案され、トポロジーと磁性の相互作用に基づく新奇な電子状態の探索が進められている[1]。CeAlSi は、空間群 $I4_1md$ を持つ非中心対称構造とキュリー温度 $T_C \sim 8\text{ K}$ の強磁性を併せ持つ稀有なワイル半金属候補物質であり、異常ホール効果やスピン分裂したバンド構造が報告されている[2]。

本研究では、電子構造およびキャリアダイナミクスを詳細に評価するために CeAlSi 単結晶に対して赤外から真空紫外領域にわたる反射率測定を行い、クラマース・クローニヒ解析を用いて光学伝導度を導出した。得られた光学伝導度スペクトルに対して Drude–Lorentz 解析を行い、自由キャリア応答およびバンド間遷移成分を分離し、DFT-DFMT 計算結果と比較して議論した。その結果、低エネルギー領域においてワイル半金属特有の振動数に線形な光学伝導度スペクトルが確認された。また、 $T_C$ 以下の線形傾きの増大は支配的になった RKKY 相互作用による強磁性に起因すると考えられる。この内部磁場が伝導電子の Dirac バンドをゼーマン分裂させることで、バンド構造に影響を与え、光学伝導度の傾きが変化したと解釈できる。

[1] E. Liu et al., Nat. Phys. **14**, 1125 (2018).

[2] A. P. Sakhya et al., Phys. Rev. Mater. **7**, L051202 (2023).

## Ce-Cu/Cu(111)-(2×2)における二次元重い電子状態

山口紘佳 木村研究室 (物理学専攻)

希土類元素を含む希土類化合物では伝導電子と  $f$  軌道の局在電子が相互作用して様々な物性を示す。伝導電子( $c$ )と  $f$  軌道の局在電子間の混成( $c-f$  混成)が強く近藤効果が支配的な場合は有効質量の大きなフェルミ液体となり、逆に  $c-f$  混成が弱く RKKY 相互作用が支配的な場合は磁気秩序状態となる。両者が拮抗する境界には量子臨界点(QCP)が存在し、この近傍では非フェルミ液体的振る舞いや非従来型超伝導などの量子臨界現象が発現する [1]。従来、このような重い電子系の研究は三次元バルク物質で多く行われてきたが、近年、低次元系における重い電子状態が注目されている [2]。その理由は、次元性低下に伴う磁気揺らぎや電子相関の増大によって外場に対して敏感に応答するため、QCPへのアクセスが容易となる期待されるためである [3]。本研究では、Cu(111)上に重い電子状態を発現する典型的な元素である Ce と基板の Cu からなる表面合金を作製し、その電子状態を放射光角度分解光電子分光(ARPES)より調査した。結果として、Ce–Cu/Cu(111)表面合金では Cu(111)基盤の原子間距離の 2 倍周期を持つ明瞭な回折パターンが低速電子線回折(LEED)により観測された。これに加えて、ARPES 測定では、基板の Cu(111)には存在しない新たな二次元的な伝導バンドが観測された。さらに、Ce 4d-4f 共鳴 ARPES によって Ce 4f 電子の寄与を明確にした結果、温度低下に伴ってフェルミ準位近傍における Ce 4f $_{5/2}$  ピーク (近藤共鳴ピーク) が顕著に発達する一方で、フェルミ波数は温度低下に対して大きな変化を示さないことが明らかとなつた。これらの結果は、Ce–Cu/Cu(111)表面合金において、遍歴性の弱い二次元電子状態が実現していることを意味し、本物質が量子臨界点近傍に位置する可能性を示唆している。

[1] P. Coleman, JPCM **13**, R723 (2001). [2] S. Chatterjee, Electron. Struct. **3**, 043001 (2021).

[3] S. Sachdev, Science **288**, 475 (2000).

## 梯子的電子構造を有する二層遷移金属酸化物における超伝導可能性 の理論的研究

工藤 大輝 黒木研究室(物理学専攻)

フェルミ準位近傍に位置するがフェルミ準位を切らないバンドを *incipient band* という[1]。フェルミ準位を切る *wide band* と *narrow band* が共存し、かつ *narrow band* が *incipient band* でもあるバンド構造を持つ系では高温超伝導が期待される[2]。このような Wide/*incipient band* の共存には二本鎖梯子系物質が望ましいが、銅酸化物梯子系でこのような状況を実現するためには、多量のキャリアドープを必要とする。そこで我々は、ドープを用いずに同様のバンド構造を持つ候補物質として  $\text{Sr}_3\text{Mo}_2\text{O}_7$  に着目した。 $\text{Sr}_3\text{Mo}_2\text{O}_7$  は一見して梯子系には見えないが、フェルミ準位を切る  $d_{xz}/d_{yz}$  軌道の異方性により、梯子系と見做すことができる[3]。本研究では、第一原理バンド計算に基づく Wannier 化により tight-binding モデルを構築し、揺らぎ交換 (FLEX) 近似を用いて線形化 Eliashberg 方程式を解くことで超伝導可能性を調べた。その結果、 $t_{2g}$  軌道間相互作用が超伝導を抑制することを確認した。これを低減する目的で、 $t_{2g}$  軌道間のオンサイトエネルギー差  $\Delta E$  導入を狙った構造歪みを検討したところ、歪みの範囲では、超伝導可能性は  $\Delta E$  の変化よりも面間 hopping の増減に強く支配されることが分かった。これを踏まえ、頂点酸素を別アニオンで置換した新規二層系  $\text{Sr}_3\text{TM}_2\text{O}_5\text{X}_2$  ( $\text{X} = \text{Cl}, \text{F}$ ) についても同様の計算を行い、 $\Delta E$  を好ましい方向に保ちつつ、hopping 増強と軌道混成による次元性上昇を伴った高い超伝導可能性を示す系が得られた。

- [1] X. Chen, S. Maiti, A. Linscheid, and P. J. Hirschfeld, Phys. Rev. B **92**, 224514 (2015).
- [2] K. Kuroki, T. Higashida, and R. Arita, Phys. Rev. B **72**, 212509 (2005).
- [3] D. Ogura, H. Aoki, and K. Kuroki, Phys. Rev. B **96**, 184513 (2017).

## 三層型および三本鎖梯子型模型における 非従来型超伝導の理論的研究

山田雄士 黒木研究室 (物理学専攻)

二層ニッケル酸化物である  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ において、高圧下で高い転移温度の超伝導が報告され[1]、多層ニッケル酸化物における超伝導に注目が集まっている。三層ニッケル酸化物である  $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$  においても、高圧下での超伝導が理論的に予想され、実験により確認された[2,3]。 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$  は三層構造を持ち、およそ 1/3-filling で面間の強い結合を有する  $d_{3z^2-r^2}$  軌道が電子物性に深く関与している。 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$  における超伝導機構の解明を目的として、揺らぎ交換 (FLEX) 近似による解析がなされているが[2]、より広いパラメータ領域での一般的な解析も重要である。二層系に対しては、相関効果をより正確に扱うことができる手法である密度行列繰り込み群 (DMRG) 法を用いた解析が梯子系でなされているが[4,5]、三層系における同様の解析も有益であると考えられる。

本研究では、FLEX 近似を用いた  $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$  を模した三層型 Hubbard 模型と、DMRG 法を用いた三本鎖梯子型模型の数値解析を行った。FLEX 近似を用いた計算では、線形化 Eliashberg 方程式の固有値が 1/3-filling 付近で大きなピークを持つことを示した。さらに DMRG 法を用いた計算では、1/3-filling 付近におけるスピン相関関数と超伝導ペア相関関数を計算し、ペア相関関数が発達するパラメータ領域があることを見出した。

- [1] H. Sun *et al.*, Nature **621**, 493 (2023).
- [2] H. Sakakibara *et al.*, Phys. Rev. B **109**, 144511 (2024).
- [3] Y. Zhu *et al.*, Nature **631**, 531 (2024).
- [4] T. Kaneko, H. Sakakibara, M. Ochi, and K. Kuroki, Phys. Rev. B **109**, 045154 (2024).
- [5] M. Kakoi *et al.*, Phys. Rev. B **109**, L201124 (2024).

## 化合物半導体 CdTe 中の不純物発光の研究

橘凜人 豊田研究室 (物理学専攻)

半導体発光の研究は 1980~2000 年頃に盛んに行われてきたが、その多くは低温におけるものであった。なぜなら、半導体の発光強度は温度と共に弱くなる傾向があり、室温で発光が観測される例は限られているためである。その中で、櫻木史郎氏によって RAP (Reactive gas Atmosphere Processing) 法を用いて作成された、Cl を不純物として含む CdTe において室温での発光が観測された。

この発光の原因を調べるために発光スペクトルの温度変化を測定したところ、室温での発光は低温で観測される発光ピークとは異なる発光原因によるものであるということが分かった。

そこで、ピークエネルギーの温度変化を測定し、その結果から準位のエネルギーを求めることで、低温では自由正孔とドナーに束縛された電子の再結合、室温付近では自由電子とアクセプタのように働く等価不純物に束縛された正孔との再結合による発光であるというモデルを構築することができた。このモデルを用いて測定された発光スペクトルのフィッティングを行ったところ、スペクトルの再現を行うことに成功した。一方で、フィッティングから得られたエネルギーはピークエネルギーから 10~15%程度の違いが生じており、この原因についても考察を行った。最後に、低温において自由正孔が存在するのか確認するために磁場測定を行った。その結果、低温において自由キャリアが存在し、その正体は正孔である可能性が高いということが確認された。

## Bi 正方格子物質の格子歪みの外場制御

田中 健護 花咲研究室 (物理学専攻)

単体 Bi の結晶構造は、パイエルス不安定性により、単純立方格子から対称性が低下した三方晶となる。一方、特定の化合物中では、二次元 Bi は正方格子を形成する。その好例として  $AMB_2$ (A:アルカリ土類金属, 希土類元素, M:遷移金属元素) が存在する。 $AMB_2$  は  $A^{2+}$ - $M^{2+}$ - $Bi^{3+}$  からなるスペーサー層とディラック電子の伝導を担う Bi 正方格子層が交互に積層した構造を持つ層状物質であり、元素置換により様々な物性パラメーターを制御することが可能である。例えば、SrMnBi<sub>2</sub> は Bi 正方格子を有する正方晶であるが、BaMnBi<sub>2</sub> は Bi 正方格子が歪み、ジグザグ鎖を形成することで、直方晶  $Im\bar{2}m$  となる[1]。BaMnBi<sub>2</sub> では Mn 副格子が室温付近で反強磁性秩序を示すため、磁歪などの影響を考慮する必要があり格子歪みのメカニズムは複雑になる。そこで、本研究では非磁性元素のみで構成される SrCdBi<sub>2</sub> に着目した。先行研究[2]では、SrCdBi<sub>2</sub> は室温では正方晶であるが、 $T_s$ (~210 K) で面内抵抗率や磁化率の温度依存性において明確な異常が報告されていた。この起源は不明であったが、本研究での光 SHG(Second Harmonic Generation) 測定により  $T_s$  以下で空間反転対称性が破れることが明らかとなり、Bi 正方格子がジグザグ鎖へ歪む構造転移であることを見出した。この構造転移が電子状態に及ぼす影響を解明するために、パルス強磁場を用いた抵抗率測定を行い、明瞭な量子振動の観測に成功した。更に超音波測定では非磁性体にも関わらず約 50 T で弾性定数と吸収係数に異常が見られ、構造変形を示唆する結果を得た。

[1] Kondo, M., Ochi, M., Kojima, T. et al. *Commun Mater* **2**, 49 (2021)

[2] Yi Yang et al 2022 *J. Phys.: Condens. Matter* **34** 315701

# 新規層状構造を有するトポロジカル磁性体の 磁気構造と量子伝導現象

山下淳志 花咲研究室（物理学専攻）

正方晶の  $\text{ThCr}_2\text{Si}_2$  型構造を有する金属間化合物  $RT_2X_2$  ( $R$ :希土類,  $T$ :遷移金属,  $X$ :14-16 族元素)は磁性、重い電子、超伝導など多彩な強相関現象の舞台として盛んに研究が行われてきた。この構造では、四面体結合した  $T-X$  層の周りに希土類元素が配位した  $R-T-X$  層が、 $c$  軸方向に  $X-X$  結合を介して逆向きに積層した構造を持つ。一方、この類似構造の  $\text{ZrCuSi}_2$  型構造 (化学組成  $RTX_2$ ) も近年、磁性を有するトポロジカル半金属・絶縁体の母構造として注目を集めている。この構造は  $\text{ThCr}_2\text{Si}_2$  型構造の単位構造の半分にあたる  $R-T-X$  層の間に  $X$  正方格子が挿入された構造とみなせ、 $R-T-X$  層では  $f, d$  電子による磁性が、 $X$  正方格子では  $p$  電子によるトポロジカルなバンド構造が発現しうるからである。

近年、我々のグループで発見された新物質  $\text{Ce}_3\text{Au}_4\text{Ge}_2\text{Bi}_4$  は、 $\text{ZrCuSi}_2$  型構造と  $\text{ThCr}_2\text{Si}_2$  型構造が交互に積層した新構造を有しており、新たなトポロジカル磁性体を開拓できる舞台として期待される。本研究では  $\text{Ce}_3\text{Au}_4\text{Ge}_2\text{Bi}_4$  の物性解明を目指し、磁化や比熱、輸送特性の測定および中性子散乱実験を行った。その結果、低温における自発磁化を有する複雑な磁気構造や、それに伴った特異な異常ホール効果、強磁場下における量子振動を観測した。発表では、磁気構造と異常ホール効果の関連について議論するとともに量子振動と第一原理計算との比較から本物質で実現している電子状態についても報告する。

**宇宙地球科学専攻  
予稿**

**開場：D307**

**2月12日（木）、13日（金）**

## 排除体積効果がある2本の高分子鎖における 絡み数のスケーリング則と時間相関

鵜木伸伍 波多野研究室（宇宙地球科学専攻）

絡み合いはコードや高分子など幅広いスケールに現れる普遍的な現象である。特に高分子では、高分子鎖が容器に閉じこめられている状況があり、絡み合いが発生する。絡み合いは粘弾性など力学的特性に影響を与えると考えられており重要である。その絡み合いを定量化する方法の1つとしてGaussの絡み数がある。Gaussの絡み数は通常閉曲線のみに定義されるが、計算上開曲線に応用することもでき、高分子モデルにおいてその静的性質が調べられている。例えば、排除体積効果がない高分子鎖（理想鎖）におけるGaussの絡み数の標準偏差について粒子数依存性が調べられている。一方、実際の高分子鎖には排除体積があり、その場合のGaussの絡み数がどのような性質を持つかはわからない。また、動的性質は力学特性への影響を考える上で不可欠であるが、十分に調べられていない。

そこで本研究では、排除体積がある2本の高分子鎖におけるGaussの絡み数の統計則を調べることを研究目的とする。分子動力学法を用いて、静的性質としてGaussの絡み数の分布関数および標準偏差、動的性質として時間相関関数および剪断応力との相互相関関数について調べた。その結果、分布関数は平均0のガウス分布になること、標準偏差は粒子数N、立方体の一辺の長さLに対して、 $N/L^{1.5}$ でスケールできることがわかった。このスケーリング則には、1本の高分子鎖と他方の高分子鎖を構成する1セグメントが接近する確率が系の密度に比例するという背景がある。また、標準偏差の粒子数依存性は理想鎖の場合と一致している。時間相関関数については、幕関数で減衰することがわかった。さらにその幕指数は密度を高めると減少する。これは密度が高まると高分子鎖が動ける空間が狭くなり絡みが解消されにくくなっていると考えられる。剪断応力との相互相関はほとんどないことがわかった。このことからGaussの絡み数と剪断応力は結びつかないと考えられる。

## 境界条件から創発されるカイラルアクティブマターの集団運動

大久保智規 波多野研究室（宇宙地球科学専攻）

アクティブマターとは、自発的に運動をする粒子の総称である。アクティブマターは相互作用によって互いの向きや速度を揃え、集団運動を引き起こす。アクティブマターの集団運動は閉じ込められた領域の形状に強く影響を受ける。また、アクティブマターの一つであるバクテリアには構造上の理由から進行方向に左右の非対称性があり、その対称性の破れの大きさ（カイラリティ）を変えることも集団運動に強く影響を及ぼす。カイラリティを持つバクテリアの懸濁液を円筒形の境界に閉じ込めて運動をさせた時、安定な渦状の集団運動を引き起こし、外側と内側で異なる回転方向を向いている二つの集団運動が共存することが知られている[1]。先行研究では、このバクテリアの運動を数理モデルとして記述し、円筒形の境界の下での集団運動が詳しく調べられている[2]。しかし、円筒形以外の境界条件で、どのような集団運動を引き起こされるかは理解が不十分である。

そこで、本研究では、このモデルの集団運動を円筒形以外の境界条件に対して調べた。そこで、i) バクテリアが一方向に流れることのできる流路にバクテリアの運動の障害となるラッチを導入し、バクテリアのカイラリティと密度を変化させながら集団運動がどのように変化するか調べた。ii) 溝で連結された二つの正方形の領域の下でバクテリアのカイラリティを変化させ、集団運動の変化について調べた。その結果、i) では流れの対称性が破れた集団運動が観測され、ii) では非自明な個体の周期的な振動現象が発生し、それらの運動はともにカイラリティに影響されていることが明らかになった。

[1] H. Wieland *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 268102 (2013).

[2] A. Negi *et al.*, Phys. Rev. Res. **5**, 023196 (2023).

## 非熱的ノイズ下のキネシンの効率評価

加藤 陸 波多野研究室（宇宙地球科学専攻）

キネシンとは分子モーターと呼ばれるタンパク質の一種であり、小胞やオルガネラなど様々な物質の輸送を担う。キネシンが動作する細胞内では、代謝反応などに由来するアクティブなゆらぎが存在しており、キネシンは非熱的なノイズ下で動作することが知られている。近年、キネシンの荷物に加えたノイズ強度が大きいほど加速する現象が実験的に観測され、キネシンは細胞内のゆらぎを活用して動作することが示唆された。しかし、細胞内のアクティブなゆらぎは揺動散逸定理を満たさないため、熱力学的な各効率量では細胞内環境におけるキネシンの効率を評価することはできない。そこで本研究では、任意のマルコフジャンプ系で成立する Kinetic Uncertain Relation (KUR) を用いて任意の物理量のゆらぎの制御効率を表す KUR 効率を定義し、非熱的ノイズ下におけるキネシンの効率を評価した。具体的には、揺動散逸定理を満たすキネシンのモデルに非熱的ノイズ項を加え、プローブとキネシンのタイムスケールの分離を仮定して摂動展開することにより、ノイズに対する加速現象と KUR 効率のノイズ強度・外力依存性を解析的に評価した。その結果、本モデルは先行研究と同様にノイズ強度が増加するとともにキネシンが加速する現象を再現した。さらに、内部状態間の遷移回数に関する KUR 効率に着目すると、細胞内環境に近い強度の非熱的ゆらぎが存在する場合に限り、最大効率 1.0 を達成することが明らかとなった。この結果は、キネシンが非熱的ゆらぎのもとで最適化される機能を持つことを示唆しており、キネシンの設計原理の解明につながると期待される。

## フェーズフィールド法を用いた 収縮亀裂パターンの成熟過程に関する研究

福島大樹 波多野研究室（宇宙地球科学専攻）

泥などが乾燥してできる亀裂パターンは日常の至るところで見られ、亀裂が作り出すパターンは多様である。収縮応力によって逐次的に形成される亀裂は、既存の亀裂に対して T 字型に交差して直線上の亀裂パターンを作り出す。この亀裂パターンにおいて、再び水分が供給されるなどして、亀裂の開閉・進展を繰り返すと、Y 字型に亀裂が交差し、六角形的なパターンに移り変わることが広く観察されている。このような亀裂パターンの成熟に関する研究では、実験的な研究が先行しており、シミュレーションを用いた研究は数少ない。そこで、亀裂の進展・合体・分岐現象を再現するフェーズフィールド法を用いて、乾燥-湿潤のサイクルにより、亀裂パターンが T 字型から Y 字型へと遷移する亀裂パターンの成熟を数値的に再現する事を目的に研究を行った。特に、再湿潤後に亀裂が閉口しても残る傷跡が次サイクルの再亀裂化を誘発するという実験的事実に基づき、生成した亀裂の場から構成した記憶の場を内部変数として新たに導入し、薄膜材料の物性を弱化させることで記憶効果を現象論的に表現した。この結果、交差角度分布はサイクルを経ることで大きく再編され、Y 字型からの標準偏差は指數的に緩和して定常化するといった先行研究で報告される傾向を再現した。次に、幾何的成熟後もエネルギー的成熟が継続し、両者の間に時間スケール分離が存在することを示した。初期サイクルでは、薄膜材料の物性の弱化がエネルギーの低下を支配し、その後のサイクルでは、亀裂の長さスケールが緩和すること遅い過程を支配することを明らかにした。また、亀裂の開口順序の入れ替わり確率を定量化したところ、初期では実験観測と同程度の確率を示し、サイクル進行に伴い単調に減少した。以上より、記憶場に沿った再亀裂化を通じて T 字型の初期状態から Y 字型へと遷移する亀裂パターンの成熟を再現し、本研究では、成熟が初期の幾何再編と亀裂の緩和の過程から成ることを定量的に整理した。

## 多層 Stick-Slip モデルのすべりダイナミクスとスペクトル解析

QIN MENGYAO 波多野研究室（宇宙地球科学専攻）

実際の地震断層は、複数のセグメントや断層ガウジ層を含む複雑なシステムであり、その層間における動的な相互作用の理解は、地震性や非地震性すべりのメカニズム解明に不可欠である。従来、数値解析においては単自由度系モデルが広く用いられ、スティックスリップの定性的な再現には成功してきた。しかし、天然断層の厚みや内部構造を考慮した場合、単一すべり面の仮定では、層間の力学的干渉やひずみの局在化プロセスを記述するには限界がある。また、先行する多自由度系研究においても、特に層間の結合強度が挙動の分岐に与える体系的な影響については、未だ統一的な理解に至っていない。

そこで本研究では、速度状態依存摩擦則および Aging Law に従う多自由度バネ・ブロックモデルを用い、断層間相互作用が地震サイクルに及ぼす影響を数値的に解析した。特に、結合剛性がシステムの安定性に与える影響を系統的に調査した結果、その強度変化に伴い挙動が質的に変化することが判明した。結合が強い場合はシステム全体が同期して振動するが、結合が弱まると剪断局在化が生じ、大振幅のスティックスリップを起こす界面と、非地震性クリープを持続する界面が共存する状態へと遷移した。

さらに、パワースペクトル密度解析により、局在化したすべり層は鋭い高調波ピークを持つに対し、クリープ層は広帯域で平滑なスペクトルを示すことを確認した。これは、両者の違いが単なる速度差ではなく、根本的に異なる運動モードへの分岐であることを示唆している。本稿では、これらの解析結果に基づき、自然界の断層におけるすべり様式の共存現象について議論する。

## 高空間分解能撮像を用いた 重力マイクロレンズ惑星系 OGLE-2014-BLG-0676L の質量測定

出射 旭 赤外線天文学グループ 住研究室（宇宙地球科学専攻）

重力マイクロレンズ法は太陽系外惑星の発見手法の一つであり、惑星系の重力によって背景星（ソース星）の光が曲げられることで生じる一時的な増光現象を利用する。増光中の光度曲線を解析することで、惑星系の質量や距離を推定することが主な目標である。本研究では、この手法により発見された惑星系 OGLE-2014-BLG-0676L の質量および距離の推定を行った。本惑星系は発見当初、光度曲線解析のみでは惑星系の質量や距離を正確に決定することはできなかった (Rattenbury et al., 2017)。そこで本研究では、Keck 望遠鏡の補償光学による高空間分解能撮像データ（以下、撮像データ）を用いて惑星系の質量および距離の推定を試みた。この撮像データはソース星と惑星系の主星の明るさの直接測定を可能にし、質量と距離に関する情報を与える。ソース星の明るさは光度曲線解析でも独立に測定されており、撮像データの結果と一致することが期待される。しかし、撮像データから得られたソース星の明るさは、光度曲線解析で測定された値とは異なることが判明した。これは、先行研究の光度曲線モデルが誤っていることを示唆している。そこで、撮像データと光度曲線データの両方に整合する解を求めるため、撮像データの情報を組み込んだ光度曲線解析を実施した。その結果、光度曲線データと撮像データの双方に矛盾のない解が得られ、 $0.59 \pm 0.15$  太陽質量の主星と  $3.00 \pm 0.71$  木星質量の惑星を持つ、地球から  $1.81 \pm 0.40$  kpc 離れた惑星系であることが判明した。本研究は、光度曲線解析を独立に行った場合、誤った解に到達する可能性があることを示し、高角分解能撮像データによる制約を組み込んだ再解析の必要性を明らかにした。

## B&C61cm 望遠鏡に設置する紫外線・可視光・近赤外線同時撮像装置 ATEA の開発

奥本 祐生 赤外線天文学グループ 住研究室 (宇宙地球科学専攻)

近年、マルチメッセンジャー天文学の進展に伴い、紫外線から近赤外線まで広くカバーできる多波長同時撮像装置の重要性が急速に高まっている。その理由の一つに突発天体の追観測がある。例えば、キロノバの観測では初期に紫外線・可視光で明るいが急速に暗くなり、数日後に近赤外線で明るくなる。この劇的な色変化を捉えるためには広波長領域を一度に観測できる装置が必要となる。また、近赤外線領域での観測が近年活発になってきていることも多波長同時撮像装置の重要性が高まっている要因の一つである。近赤外線領域での観測はダスト減光の影響を受けにくく、銀河系中心方向の観測が可能である。我々の研究グループでは、PRIME 望遠鏡という広視野近赤外線望遠鏡を南アフリカ共和国に建設し、重力マイクロレンズイベントを中心とした突発天体探査を行っている。しかし、PRIME 望遠鏡などが発見したそれらの突発天体を紫外線から近赤外線まで追観測できる装置は日本の天文学コミュニティーがアクセスできる場所にない。

このような背景から、本研究ではニュージーランドにある B&C61cm 望遠鏡に設置する紫外線(350-400nm)・可視光(550-940nm)・近赤外線(1170-1720nm)の 3 バンドを同時撮像する装置である ATEA (Aotearoa Triple-band Equipment for Astrophysics) の開発を行った。開発過程では、ATEA の光学設計と光学系に関する公差解析を光線追跡ソフト zemax を用いて行い、その後 ATEA の筐体設計を 3D-CAD を用いて行った。可視光・近赤外線領域の観測に必要な物品については製作が完了しており、2026 年 2 月下旬に B&C61cm 望遠鏡へのインストールおよび可視光・近赤外線領域での試験観測を行う。来年度以降には紫外線領域観測に関わる物品の製作が予定されており、3 バンド同時観測が実現する。

## フィールドの実視連星を用いた gyrochronology の検証

長野 冬瑚 赤外線天文学グループ 住研究室 (宇宙地球科学専攻)

自転周期と有効温度に基づいて恒星年齢を推定する gyrochronology は、太陽型星に対して有効であり、直接年齢測定が困難なフィールド星の年齢推定に広く用いられている。

Skumanich (1972) により自転周期が年齢の平方根に比例する ( $P_{\text{rot}} \propto \sqrt{t}$ ) 経験則が提案されて以降、散開星団の観測に基づき、質量・年齢依存性を考慮したモデルが構築されてきた。しかし、これらの関係式は主に散開星団で較正されており、より多様な形成環境を持つフィールド星に対する適用可能性は十分に検証されていない。

本研究では、同時形成により同年齢を持つと期待される実視連星を用いて、散開星団で較正された gyrochronology のフィールド星への適用可能性を検証した。Kepler 測光データから自転周期が測定された FGK 型星と、Gaia 位置天文データにより同定された連星カタログをクロスマッチし、主星・伴星の両方で自転周期が得られている 32 組の連星を抽出した。これらに対し、補間型 gyrochronology モデルの gyro-interp (Bouma et al. 2023) を用いて、以下の 2 つのアプローチで検証を行った。

第一に、連星が同年齢を持つと仮定し、モデルが予測する自転周期と観測値の差  $\Delta \log P = \log P_{\text{rot,obs}} - \log P_{\text{rot,model}}$  を定義し、混合分布モデルを用いて散開星団で較正されたモデルとの整合性を評価した。第二に、階層ベイズモデルを用いて、主星と伴星で独立に推定された年齢差  $\Delta \log t = \log t_2 - \log t_1$  の分布を統計的にモデル化した。これらの解析により、フィールドの実視連星に対する散開星団により較正された gyrochronology の妥当性を評価した。その結果、約 90% の連星でモデルと観測が整合し、散開星団で較正された gyrochronology がフィールド星に対しても適用可能であることが示された。

## Normalizing Flow を用いた銀河系モデルの高速化

西尾茉優 赤外線天文学グループ 住研究室（宇宙地球科学専攻）

重力マイクロレンズイベントにおいてレンズ・ソース天体の質量や距離を正確に推定するには、光度曲線情報と銀河系モデルに基づく事前分布を統合したベイズ推論が不可欠である。従来は、光度曲線パラメータを無情報事前のもとで推定した後、銀河系モデルに基づいて物理量を再重み付けする二段階法が広く用いられてきた。この手法は計算効率に優れる一方、尤度近似に伴う情報の消失や、非物理的な解が第一段階で強く寄与することによる推論の不安定性といった問題を抱えている。

これらを回避するには、推論の初期段階から銀河系モデル事前分布を明示的に組み込んだ一体型のベイズ推論が望ましい。しかし銀河系モデルは通常モンテカルロサンプルとして与えられるため、任意の物理量に対する確率密度を直接評価できず、事前分布を反復的に評価する一体型推論では計算コストが大きなボトルネックとなる。

本研究ではこの課題に対し、銀河系モデルから生成したモンテカルロサンプルを Normalizing Flow (NF) で学習することで、高次元の銀河系モデル事前分布を明示的な確率密度関数として近似する手法を提案する。これにより、従来はサンプリングに依存していた事前分布を高速に評価可能となり、一体型ベイズ推論への実装が現実的となる。また、学習された分布は自動微分が可能であり、将来的には Hamiltonian Monte Carlo (HMC) など勾配情報を用いた高効率推論への応用も期待される。越本銀河モデルに基づく 100 万個のサンプルを用いて NF を学習した結果、周辺分布および相関構造が良好に再現されていることをコーナープロットにより確認した。さらに、C2ST (AUC)、MMD<sup>2</sup>、Energy distance を用いた定量評価においても、元の銀河系モデル分布との高い一致を示した。本発表では、NF による銀河系モデル事前分布学習の手法と、その再現性能の検証結果について報告する。

## 安山岩へのレーザー照射で形成される融解物を伴うクレーター形状の解析

佐藤楓紀 桂木研究室（宇宙地球科学専攻）

機械による岩石の掘削が不適切な場面において、高強度レーザーの照射による岩石の切削加工が検討される場合がある。岩石に対して高強度のレーザーを照射した際に、掘削と同時に融解が起こり、多様な形態を形成し、掘削のエネルギー効率の低下をもたらす場合がある。一方、月面や小惑星表面の粒子上にはマイクロ・メーター・スケールのクレーターが見つかっている。これらの微小クレーターには融解物が飛散したような跡が見られるが、その形成条件は明らかになっていない。そこで本研究では、安山岩標的に対して高強度レーザー（100 ~ 1000W）を比較的長時間（5 ~ 100 s）照射し、レーザーの照射条件パラメーターを系統的に変化させて、掘削の様相、特にクレーター形状と融解物の特徴を観察した。

レーザー照射により形成されたクレーターの形状を、光学変位により計測し、得られた 3 次元クレーター形状データから、クレーターの直径、体積を算出した。

算出したクレーター形状の特徴とレーザー照射条件との関係から、クレーター径と照射エネルギーの間に明確な相関は見られなかった。一方、クレータ一体積と照射エネルギーの間には正の相関は見られたものの、両者は比例ではなく非線形な依存性を示した。実験データの詳しい解析により、この非線形な関係を説明するスケーリング則を見出した。得られたスケーリング則から融解物が残留する条件の検討に有用と思われる関係式が導かれた。この条件を衝突クレーターに適用することで、微小クレーターに融解物の痕跡が残る条件について検討した結果を報告する。

## 資産のマクロ分布とミクロダイナミクスを 再現するモデルの構築について

田吹 修人 桂木研究室（宇宙地球科学専攻）

資産の分布はその上位層がべき分布に従い、上位 10%の個体だけで全体の約 8割の資産を占有するほどに資産の偏在化が年々進んでいる。さらに分布の両端、つまり資産家と貧困層が、その他の層の個体に比べて資産ランキングの流動性が低いことが問題視されている。このようなマクロの指標と各個体の資産保有量の時間発展のようなミクロのダイナミクスを单一の枠組みで記述する資産モデルは、資産の時系列データが存在しない制約もあり未完成である。モデル構築の研究の中で、物理学の知見を駆使して実経済を資産の拡散則とその他の要素の組み合わせだけで大胆に粗視化し、その本質的な構造の説明を試みるアプローチがあり、その中で実経済のマクロな統計量の一部を説明できるモデルが構築された（このモデルを再分配 YSM と呼ぶ）。しかしその研究含め、この分野では資産の交換による拡散的挙動とその他の要素の付加により、マクロ定常分布について議論されてきた。しかし、ミクロ・ダイナミクスの観点から評価するモデル構築はこれまでなされていない。そこで本研究では、再分配 YSM がミクロ・ダイナミクスをどこまで記述できているのかを、流動性を表す特徴量を実データから計算し、シミュレーション結果との照合を行うことで評価した。その結果、このモデルがダイナミクスを一定程度記述しうる現状唯一の候補であることを明らかにした。さらにそのモデルの設計から、実経済で資産を持たざる者が破産しないように設計される資産量に対するレバレッジの制約が、個体差や資産を持つ者への恣意的な優遇を与えなくても取引を繰り返すことで自然とこのような大きな格差を生むという示唆を見出した。

## 木星衛星ガニメデの金属核と磁場の進化

川上 稜平 松尾研究室（宇宙地球科学専攻）

木星衛星ガニメデは衛星で唯一、金属核ダイナモを起源とする双極子磁場を持っている。慣性能率から推定される内部は、中心の金属核、岩石マントル、表層の H<sub>2</sub>O 層の三層に分化しており、核ダイナモの駆動には、融解した核の冷却に伴う熱・組成対流の発生が必要である。核のこうした熱状態と進化、そして磁場の発生は、岩石マントルの発熱量と熱輸送効率、核の軽元素組成（融点）などの性質が制御する。しかしながら、現状の少ない観測的制約下では内部各層の量比に不定性が大きいだけでなく、マントルや核の組成に関わるガニメデのバルク組成も分かっていない。こうした不定性は内部の熱進化や核の凝固過程を大きく変え、核ダイナモの駆動機構を変えうるため、実際の内部構造を正しく推定するためには、核組成による凝固過程の違いを考慮しつつ、重力場と磁場の観測値に整合する内部構造およびバルク組成を決める必要がある。

本研究では、核内の凝固過程を組み込んだガニメデの熱進化および磁場の進化を記述する理論モデルを構築した。さらに、バルク組成としてコンドライト的組成（H、L、LL、CI、CM、CO、CV、CK）を仮定した内部構造に本モデルを適用し 46 億年間の計算を行うことで、磁場観測と整合的な内部構造およびバルク組成を見出した。その結果、H コンドライト組成（核半径 830 km、核の硫黄含有量 13 wt.%、岩石マントル層の厚さ 860 km、H<sub>2</sub>O 層の平均密度 1300 kg m<sup>-3</sup>）が最も観測磁場を再現した。一方で、LL、CO、CV、CK コンドライト組成では観測磁場を再現できないことが示された。2031 年に木星系へ到達予定の JUICE 探査機による重力場・磁場観測は、慣性能率の推定精度向上、H<sub>2</sub>O 層の詳細構造の解明、ならびに核の凝固過程に対する制約を与え、本研究の結果を検証する上で重要な役割を果たすと期待される。

## 太古代地球海洋の反射特性に基づく新たな生命探査指標の提案

新井 千紘 松尾研究室（宇宙地球科学専攻）

2040 年代の Habitable Worlds Observatory (HWO) をはじめとする次世代宇宙望遠鏡は、地球型太陽系外惑星の直接撮像を通じて、ハビタブル惑星の特定やバイオシグネチャーの探索を大きく進展させることが期待される。地球型系外惑星における表層の水の検出は HWO の主要な科学目標の一つであり、海洋を持つ惑星の識別は生命探査においても重要な課題である。一方、地球史では漸進的な酸化に伴って海洋の化学環境は変遷し、過去の海洋は現在とは大きく異なる様相であった可能性がある。本研究は、将来の地球型系外惑星の反射光観測における新たな生命探査指標の提案を目的として、Matsuo et al. (2025) により提案された緑の海仮説に基づき、太古代地球海洋における海洋内部物質に起因した海洋の色の変化に着目した。本研究では特に、シリカ粒子および水酸化鉄粒子に富む海洋を想定し、海洋内部物質の吸収・散乱特性から水中の輻射輸送、海面境界条件、惑星大気を含む反射光計算へと接続する枠組みを構築し、海洋の反射特性の変化が惑星反射光に与える影響を検討した。

本研究の結果、海洋反射スペクトルは海洋内部物質の吸収・散乱特性に応じて反射量およびスペクトル形状が大きく変化し、その差は惑星反射光としても明確に反映され得ることが示された。特に、水酸化鉄の吸収に由来する可視域の特徴的なエッジ構造、および粒子による可視域での散乱の増大と近赤外域における水の強い吸収に伴う可視-近赤外域のコントラスト変化は、惑星反射光上でも識別可能な特徴として現れた。これらの結果は、海洋が持ち得る反射特性の多様性を示すとともに、系外惑星観測でしばしば仮定されてきた低アルベドの海洋が必ずしも一般的ではないことを示す。本研究は、「海洋の色」を将来の直接撮像観測における新たな観測指標として位置づけ、ハビタビリティ指標およびバイオシグネチャーとしての海洋の観測可能性を示す。

## 下部マントル条件下における準安定 CM ペロブスカイトの 相転移カイネティクス

中村 虎太郎 近藤研究室（宇宙地球科学専攻）

地球の下部マントルは、主にブリッジマナイト ( $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$ )、デイブマオアイト ( $\text{CaSiO}_3$ )、フェロペリクリース ( $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O}$ ) によって構成されている。上部マントルの鉱物であるダイオプサイド ( $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ) は下部マントルに相当する約 24 GPa 以上の高圧下でブリッジマナイトとデイブマオアイトに分解相転移し、両相間の固溶は限定的であると考えられている (e.g. Wang et al., 2025)。一方で近年、ブリッジマナイトへ多量の Ca が固溶する可能性 (Ko et al., 2022) や、衝撃を受けた天然隕石中から、これらの中間組成をもつ  $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{SiO}_3$  ペロブスカイト (以下、CM ペロブスカイト) が発見される (Xie and Gu 2023) など、CM ペロブスカイトが下部マントル条件において安定相として存在する可能性が指摘されている。そこで本研究では、下部マントル条件での CM ペロブスカイトの熱力学的安定性を実験的に検証し、ダイオプサイドの分解過程において CM ペロブスカイトが安定相・準安定相のどちらであるかを解明することを目的とした。実験にはマルチアンビルプレスを用い、長時間の高温高圧回収実験および放射光 X 線を用いた時分割 XRD その場測定を実施した。回収実験では CM ペロブスカイトは観察されず、ブリッジマナイトとデイブマオアイトのみが観察された。したがって、下部マントル条件下では二相ペロブスカイトが支配的だと考えられる。時分割 XRD 測定では CM ペロブスカイトの形成が観察され、その後の高温維持で徐々に分解していく様子を連続的に捉えることに成功した。さらに、実験データからカイネティクスモデルを構築し分解時間を推定することで、隕石中の CM ペロブスカイトは急冷によって保存された準安定相であることを示唆した。本研究の結果は、ブリッジマナイトへの Ca 固溶の議論を進展させ、天体衝突現象の理解に重要な制約を与えるものである。

## 火星衛星の形成過程における放射圧の影響

北原大地 近藤研究室（宇宙地球科学専攻）

フォボス・ダイモスの巨大衝突起源説では、衝突で生じたデブリ円盤から衛星が集積すると考える。しかし平滑化粒子法 (smoothed particle hydrodynamics; SPH) などの衝突計算が与えるのは、非軸対称で高離心・高傾斜の軌道要素をもつ破片群であり、長期の衛星形成モデルが仮定する軸対称・薄い準定常円盤とは直接接続できない。両者の間に残る遷移期、すなわち衝突直後の非軸対称な破片群が位相混合と衝突散逸を経て準定常円盤へ緩和する段階では、短期間で円軌道化・赤道化が進む一方、衝突破碎による粒径分布の変化と高温下での昇華・蒸気散逸により微粒子が増加し、放射圧によるブローアウトが進行することで、ロッシュ限界内側円盤の固体質量を不可逆に減少させ得る。長期モデルは内側円盤の粘性拡散と惑星への落下を主に扱うため、遷移期の損失を無視すると内側円盤質量を過大評価し、外側への供給量と最終衛星質量の推定に影響を及ぼす可能性がある。

本研究では軸対称一次元モデルを構築し、粒径分布を Smoluchowski 方程式に基づく凝集・破碎カスケードとして追跡する。さらに鉛直方向を深部と表層の二層に簡約し、表層に対する放射圧流出と、Hertz-Knudsen-Langmuir (HKL) 式に基づく質量フラックスを結合する。遷移期に長期モデルに含まれない経路で失われる固体質量を定量化し、短期間での質量損失を見積もることを目的とする。様々なパラメータを用いてシミュレーションを行ったところ、遷移期の過程により内側円盤から短時間のうちに最大で火星質量の  $10^{-5}$  程度が失われ得ることを示した。

## GHz-DAC 音速測定法の開発： $\text{H}_2\text{O}$ 高圧固体相の高圧下音速測定に向けて

松井亮介 近藤研究室（宇宙地球科学専攻）

地球および惑星内部構造は地震波速度構造として理解されており、構成物質の高圧条件下における弾性波速度（音速）データの取得は地球惑星内部物質学において重要である。本研究では、音速測定手法の1つである GHz 法と高圧発生装置であるダイヤモンドアンビルセル (DAC) を組み合わせた GHz-DAC 音速測定法を用い、 $\text{H}_2\text{O}$  の高圧下音速測定を目的とした。 $\text{H}_2\text{O}$  の高压固体相は氷天体の主要構成物質であるとともに、地球内部の低温沈み込みスラブでの存在が示唆されており、重要な研究対象である。

本研究では、解析手法として、測定により得られた信号のフーリエ係数の可視化と係数選択による部分和再構成を導入し、元データに含まれる  $\text{H}_2\text{O}$  試料由来信号と SUS / Re ガスケット由来信号の分離を試みた。従来はガスケット信号の混入を避けるために試料面積を大きく取る必要があったが、このような DAC セルでは安定した高圧実現が技術的に難しかった。しかし本解析手法により信号の分離が可能となり、キュレット面に対するガスケットの専有面積を確保した安定な高圧セル条件下でも測定が可能となった。

数 GPa 条件では、先行研究と調和的な音速データの取得に成功し、測定実績の少ない GHz-DAC 音速測定法の信頼性向上を示した。一方、60–70 GPa の測定点では、ダイヤモンドアンビルのキュレットのカッピング変形により試料長の精密決定が困難となることが主要な課題であることが明らかとなった。

## 液体アルゴン Time Projection Chamber を用いた MeV ガンマ線検出器 NanoGRAMS の設計開発とコンプトン再構成の実証

翼 隆太朗 松本研究室（宇宙地球科学専攻）

GRAMS (Gamma-Ray and AntiMatter Survey) 実験は、宇宙核反応における唯一の直接的なプローブとなる MeV ガンマ線帯域での高感度天体観測と、反粒子検出を通じた暗黒物質の間接探索を目的とした日米共同計画である。GRAMS 実験では、検出器として大型の液体アルゴン Time Projection Chamber (LArTPC) を用いており、我々はコンプトンカメラとしての動作実証を目的とした小型の MeV ガンマ線検出器 NanoGRAMS の開発を進めている。MeV ガンマ線が検出器内に入射すると、アルゴン原子との相互作用（主にコンプトン散乱）により電離電子およびシンチレーション光が生成される。LArTPC では、これらを同時に検出することで、相互作用 (hit) が生じた三次元的位置と、ガンマ線が失ったエネルギーを測定できる。検出器内でガンマ線が複数回 hit した場合、各 hit の位置情報とエネルギー損失を用いることで、エネルギー・運動量保存則に基づいたガンマ線のイメージングが可能となる。本研究では、まず有感部サイズ  $51.2 \times 51.2 \times 100 \text{ mm}^3$  の LArTPC 筐体の設計・開発を行い、液体アルゴン充填試験を実施した。その結果、初期設計の NanoGRAMS ver. 1 では、電離電子読み出し系の温度管理および液体アルゴン純度の二点に課題があることが明らかとなった。これらのうち、温度管理の課題に対しては筐体設計を改良した NanoGRAMS ver. 2 を新たに開発した。次に、液体アルゴン中の不純物の影響により電離電子が TPC 内をドリフトできない問題に対し、充填・純化系の段階的な改良を行った。その結果、電子信号を安定して読み出すことが可能な液体アルゴン純度 ( $\sim 1\text{ppb}$ ) を達成した。最後に、NanoGRAMS ver. 2 を用いてガンマ線信号の取得試験を行った。 $^{22}\text{Na}$  および  $^{60}\text{Co}$  線源から放出される 511 keV, 1275 keV および 1173 keV, 1333 keV のガンマ線を測定した結果、取得したエネルギースペクトルにおいてコンプトンエッジを確認した。さらに、複数 hit イベントの取得に成功し、2 hit イベントに対して、入射エネルギーを固定した条件下でのコンプトン画像再構成に成功した。本発表では、これらの結果と今後の展望について報告する。

## パワーレーザー駆動無衝突衝撃波における高エネルギーイオン測定

豊田祐生 レーザー科学研究所レーザー宇宙物理学グループ（宇宙地球科学専攻）

宇宙空間には宇宙線と呼ばれる高エネルギー荷電粒子が存在し、地球にはそれらが絶えず飛来している。特に、 $10^{15.5} \text{ eV}$  以下のエネルギーを持つ銀河宇宙線は、無衝突衝撃波によって加速されると考えられている。無衝突衝撃波とは、荷電粒子同士のクーロン衝突がほとんど起こらない無衝突プラズマ中に形成される衝撃波である。また、衝撃波の上流側に高エネルギーイオンが存在することが理論的に示唆されており、これらが衝撃波のダイナミクスに重要な役割を果たす可能性が指摘されている。これらのイオンは上流側の媒質と相互作用し、プラズマ微視的不安定性を引き起こす。我々の長期的な目標は、衝撃波の構造や高エネルギーイオンの加速機構、さらにはそれらがプラズマ微視的不安定性に与える影響を明らかにすることである。

本研究は、レーザー実験を用いた無衝突衝撃波の構造解明と、衝撃波で加速された高エネルギーイオンの計測を目的としている。実験では、大阪大学レーザー科学研究所のパワーレーザー激光 XII 号を数 Torr の窒素雰囲気ガス中で固体ターゲットに照射することで静電型無衝突衝撃波を生成した。協同トムソン散乱計測、可視自発光計測、およびシュリーレン計測の同時計測を行い、プラズマ密度・温度・流速等の空間分布を求めた。その結果、窒素ガス圧が比較的低い条件のショットにおいて、協同トムソン散乱計測から、同一の空間位置に異なる速度を持つ二つのプラズマ成分が存在することが示された。これにより、高エネルギーイオンが衝撃波上流側に存在することを実験的に初めて観測することに成功した。さらに、シュリーレン計測によって衝撃波面を同定し、その空間位置を決定できることが明らかになった。これらの新たに得られたデータを基に、実験室における無衝突衝撃波の空間構造について考察する。

## XRISM 衛星搭載 Resolve を用いた高分解能分光による ブラックホール連星 4U 1630-472 の電離吸収の時間変動

河村穂登 松本研究室（宇宙地球科学専攻）

ブラックホール X 線連星は、伴星から供給された物質がブラックホールへ降着する過程で降着円盤を形成し、重力エネルギーの解放によって強い X 線放射を示す天体である。これらの系では降着率や幾何が短時間で変化し状態遷移が起こるため、降着流の物理過程を検証する上で重要である。さらに、円盤表面からの質量流出として円盤風が存在しうると考えられているが、円盤風の駆動機構や幾何構造は未解明である。高分解能分光は円盤風の電離状態や速度構造などの物理量を制限する上で有効である。近年、XRISM 衛星搭載の X 線マイクロカロリメータ Resolve により、従来の X 線 CCD カメラと比較して 2 枠高いエネルギー分解能 (6 keV の X 線に対し約 5 eV) で高分解能 X 線分光が可能となった。ブラックホール連星 4U 1630-472 はアウトバースト時に明るく、強い鉄吸収線を示すことで知られるため、円盤風を理解する上で重要な天体である。本研究では、XRISM/Resolve により観測されたブラックホール X 線連星 4U 1630-472 の高分解能 X 線スペクトルを用い、7 keV 付近に現れる高電離鉄吸収線 (H 状鉄, He 状鉄) について、イオン柱密度、速度シフト、乱流速度幅の時間変動を調査した。時間分割したスペクトルの解析により、観測中に連続光が約 10% 減光し、その前後で He 様鉄の吸収だけが急激に増加することと、速度シフトの変化が H 状鉄と He 状鉄で異なることを示した。これらから、H 状鉄と He 状鉄は別起源であり、He 状鉄に関してはまず、円盤から立ち上がった放出流であると考えられる。一方、H 状鉄にトレースされる高階電離ガスに関しては、さらに He 状鉄の共鳴線の深さが他の微細構造による吸収と比べて弱いことに注目した。これは、高階電離ガスによるトムソン散乱および再放射の寄与により説明できる可能性がある。そこで、モンテカルロ X 線放射輸送コード MONACO を用い、厚みのある円盤構造からの放射スペクトルを計算し、最終的に被覆率を  $\lesssim 0.3$  に制限した。

## XRISM による低光度活動銀河核 NGC 7213 の X 線観測

村上 海都 松本研究室（宇宙地球科学専攻）

活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) は超大質量ブラックホールへの物質降着により駆動される。特に、低降着率の AGN は、高温の放射非効率降着流 (Radiatively Inefficient Accretion Flow; RIAF) と呼ばれる降着構造を持つと考えられているが、RIAF を含むブラックホール周辺における高階電離輝線を生成するガスの起源や力学的な運動は、検出感度の制約により詳細な情報が得られていないため十分に理解されていない。とりわけ、Fe XXV (6.7 keV) および Fe XXVI (6.97 keV) における輝線あるいは吸収線のドップラー幅やそれらの線強度比などはガスの物理状態そして起源の理解において、重要な情報を与える。XRISM 衛星には、従来の X 線 CCD カメラと比較して 2 枠高いエネルギー分解能 ( $\Delta E_{FWHM} = 5 \text{ eV}$  at 6 keV ( $\Delta v_{FWHM} \sim 250 \text{ km/s}$ )) を有する X 線マイクロカロリメータ (Resolve) が搭載されている。Resolve を用いた観測は、低降着率に特徴づけられる AGN を明らかにするための強力な手段である。

本研究では、近傍の低エディントン AGN である NGC 7213 の XRISM および NuSTAR における同時観測データを解析した。2 – 60 keV の広帯域スペクトルから連続成分を制限した上で、Resolve による鉄輝線帯域に注目し、Fe XXV He $\alpha$  および Fe XXVI Ly $\alpha$  輝線が光電離または衝突電離のどちらの過程によって生成されているのかを検証した。両輝線のドップラー幅が異なる可能性 ( $FWHM_{XXV} = 1860 \text{ km/s}$ ,  $FWHM_{XXVI} = 6130 \text{ km/s}$ ) が示唆されたことから、1 成分に加えて 2 成分での光電離モデルと衝突電離モデルのスペクトルフィットも行った。しかし現時点のデータからは支配的な電離機構を一意に特定することは困難であることがわかった。また、いずれにおいても追加の成分は統計的に有意とは言えない結果となった。さらに、Fe XXV He $\alpha$  の微細構造輝線の特性について議論する。加えて、2 枠程度エディントン比が低い M 81\*との比較からエディントン比に依存した AGN の特徴の違いについて考察する。

## 活動銀河核観測から探る超巨大ブラックホール連星系からの重力波 草壁克典 長峯研究室（宇宙地球科学専攻）

超巨大ブラックホール連星系 (SMBHB) はブラックホール合体に密接に関連する重要な天体である。こうした連星系の放射を捉える手法として、パルスの到達時刻の変化から重力波を検出する Pulsar Timing Array (PTA) 観測を始めとした重力波観測が注目されており、実際に重力波の重ね合わせである背景重力波 (SGWB) の存在が示唆されている。PTA 観測に加えて、将来的には宇宙空間に配置したレーザー干渉計により時空の歪みを検出する Laser Interferometer Space Antenna (LISA) などの宇宙重力波干渉計を用い個別の SMBHB としての重力波源を検出することが期待されている。こうした背景重力波の推定や個別 SMBHB の検出予測にあたり、従来は銀河合体に基づく準解析モデルや宇宙論的シミュレーションによる合体頻度分布が用いられてきたが、これらは超巨大ブラックホールが直接駆動する活動銀河核 (AGN) の観測に基づくものではなく、間接的な推定に留まるという課題があった。

本研究では、AGN の個数密度分布と 2 つの活動銀河核が対をなすペア AGN の観測結果を統合し、AGN 観測量に基づく SMBHB 分布モデルを構築した。このモデルでは、低光度では高く (~1-10 %) (e.g., Koss et al. 2012)、高光度では低い (~0.01%) (e.g., Silverman et al. 2020) という特徴的なペア割合の光度依存性を取り入れた SMBHB 分布モデルを提案した (Kusakabe et al. 2025)。その結果、本モデルは背景重力波のスペクトルを再現し、重力波と AGN の両観測が整合することが分かった。加えて、この分布モデルを土台に次世代電波観測である Square Kilometre Array を用いた PTA および LISA をはじめとした宇宙重力波干渉計に対し、信号雑音比を基に検出可能な系をサンプリングすることで重力波観測の検出能力を評価した。本発表では、我々のモデルと従来のモデルとの比較を通じ、背景重力波の評価や将来的な重力波観測の展望について議論する。

## ブラックホール降着円盤コロナにおける非熱的電子を考慮した X 線偏光輻射輸送計算 小林莉久 長峯研究室（宇宙地球科学専攻）

ブラックホール X 線連星は、降着円盤と高温コロナからなる二相構造をもち、硬 X 線放射はコロナでの逆コンプトン散乱により形成される。しかし、コロナの具体的な幾何構造やその物理起源は依然として謎に包まれている。この問題を解決する手段として近年注目されているのが X 線偏光観測である。偏光度 (PD)・偏光角 (PA) は散乱領域の幾何構造に依存するため、構造の違いが観測される偏光特性に直接反映される。X 線偏光観測衛星 IXPE の運用開始により、コロナの幾何構造に対する観測的制約が得られつつあるものの、一方既存のシミュレーションコードはコロナの幾何構造、任意の電子スペクトル、光子の詳細な散乱履歴、散乱回数といった複数の要素を同時に扱うには十分ではない。

そこで本研究では、幾何構造・電子スペクトル・散乱過程を柔軟に扱える独自のモンテカルロ輻射輸送コードを開発し、それらの要素がスペクトルおよび PD, PA に与える影響について調査した。その結果、幾何構造の違いが明確に PD, PA の差を生み出すことが示され、これらは偏光の散乱理論と整合的であった。また円盤状に薄く広がるスラブ型コロナについて、スペクトルの形状が視野角によらないことを突き止め、この原因が散乱回数の視野角非依存性にあることを突き止めた。また、近年観測的証拠が見つかりつつある非熱的電子の寄与についても調べた。その結果、エネルギー密度比 4%以上の非熱的電子を含んだ場合、1-10MeV の高エネルギー光子が効率的に生成されることが確認された。今後はさらに統計精度を向上させることで MeV 帯の偏光特性を理論的に予言するとともに、2027 年打ち上げ予定の MeV ガンマ線観測衛星 COSI によって得られるデータと比較することで、コロナ内の非熱的電子の割合や空間分布に対して強い制約を与えることを目標とする。

## 銀河進化における AGN フィードバックの影響の解明

西濱大将 長峯研究室（宇宙地球科学専攻）

現代宇宙における銀河は、超新星（SN）や活動銀河核（AGN）から大きな影響を受けて進化してきた。これらからのフィードバック過程を導入しない場合、ガス冷却と星形成が過剰に進行し、特に重いハローで観測を大きく上回る星形成が生じることが分かっている。そのため、SNからのエネルギー注入や中心ブラックホールの成長に伴う AGN からのフィードバックは、銀河の質量関数や星形成効率、さらには群・銀河団環境における高温ガスの熱力学状態を再現するうえで重要な要素である。しかし、いつ、どのような物理条件で、AGN が SN をエネルギー的に凌駕し、銀河進化の主要な調整役となるのかは十分に明確ではない。そこで本研究では、宇宙論的流体シミュレーション CROCODILE を用いて、SN と AGN の相対的エネルギー寄与がいつ・どのような条件で交代するかを定量化した。AGN フィードバックの影響が特に顕在化すると期待されるハロー質量  $10^{12} \leq M_{\text{halo}}/M_{\text{sun}} \leq 10^{14}$  の中心銀河を 4 つのグループに分けて解析を行った。またその際に、AGN の寄与を対照実験的に抽出するために、ブラックホールを除去した場合のシミュレーションなどとの比較も行った。その結果、銀河進化は初期の SN 支配段階、中間段階、そして後期の AGN 支配段階という三つのフェーズに分けられることが分かった。SN 支配段階は、銀河中心部の物理が重要であり、AGN 支配段階においてはハローおよび銀河規模でのエネルギー収支が重要となることが分かった。SN 支配段階から中間段階へは、恒星質量および中心表面密度において、ハロー質量にほぼ依存しない形で  $M_* \sim 10^{9.5} M_{\text{sun}}$ ,  $\Sigma^*_{3\text{kpc}} \sim 10^{8.4} M_{\text{sun}} / \text{kpc}^2$  で起こる事がわかった。また、累積した AGN エネルギーがハローガスの束縛エネルギーの数倍を超えたときに、長期的な AGN 支配が始まり、自己制御の段階に入ることを明らかにした。

## Constraints on cosmological parameters with Fast Radio Bursts

Shiyuan Wang 長峯研究室（宇宙地球科学専攻）

Since their discovery in 2007, fast radio bursts (FRBs) have emerged as a promising new cosmological probe. As each FRB signal accumulates dispersion from ionized plasma along its line of sight, FRB observations provide a unique and direct tracer of the diffuse baryonic matter in the Universe. In particular, the spatial clustering of FRBs enables statistical analyses that extend beyond individual line-of-sight measurements. Nevertheless, how to optimally exploit correlations between FRBs and large-scale structure to extract precise cosmological information remains an open question.

In this work, we systematically investigate the cross-correlation between FRB dispersion measures (DMs) and galaxy surveys, treating FRBs as background sources located behind galaxy halos. Using a simulated FRB catalog together with spectroscopic galaxy samples from the China Space Station Telescope, we perform two cosmological studies. First, we focus on measuring the cosmic growth rate. Under the kinetic Sunyaev-Zeldovich (kSZ) velocity reconstruction framework, we demonstrate that the DM-galaxy power spectrum enables the reconstruction of galaxy-electron correlations  $P_{ge}$ , thereby breaking the conventional kSZ dependence on the poorly constrained  $P_{ge}$ . Using Fisher matrix forecasts combined with MCMC analyses, we obtain precise constraints on the growth-rate parameter. Second, we exploit the statistical properties of FRB DMs to place high-precision constraints on the evolution of the fine-structure constant. Our results demonstrate that FRBs provide a powerful and independent avenue for precision cosmology and fundamental physics, with strong potential for future large-sample, multi-wavelength observations.

## 局所 U-Pb 年代分析と微小部 XRD 測定から探る C 型小惑星衝突史 上原佑斗 寺田研究室 (宇宙地球科学専攻)

C 型小惑星族 Polana, Eularia の存在や、小惑星 Ryugu, Bennu のラブルパイル構造は、直径 100km サイズ以上の C 型小惑星の母天体が壊滅的な天体衝突によって小片に破碎された証拠である (Walsh et al. 2013; Bottke et al. 2015; Nakamura et al. 2020 など)。しかし S 型小惑星に由来する普通コンドライトの熱変成年代が Ar-Ar 年代測定法などで精査されているのに対し、C 型小惑星由来の炭素質コンドライトの衝突年代に関しては、Ar-Ar 法や U-Pb 法の測定難度の高さから先行研究が少なく、誤差も大きいため、その衝突年代史はよく分かっていない (Amsellem et al. 2020)。

そこで本研究では、高空間分解能を有する質量分析装置 NanoSIMS 50 を用いて、熱変成の痕跡のある炭素質コンドライトである NWA11024 (Ebert et al. 2019), B-7904 (Nakato et al. 2008), Y-86695, Y-82054, Y-82098 (King et al. 2021) の U-Pb のシステムティックスを調査した。2 次的な熱変成によって U-Pb 系が乱された可能性のあるサンプルに対し、半減期の異なる 2 つの放射壞変系 ( $^{238}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}$  系、 $^{235}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}$  系) を精査することで、結晶化年代および熱変成年代の情報を得ることができた。更に、同隕石中の鉱物に対する微小部 X 線回折測定からサンプルが保持する残留応力の推定も実施し、これらの試料が経験した衝撃変成の描像について考察を行った。

## ミニコンドルールの酸素同位体分布から探る CV コンドライト母天体集積史 花井翔 寺田研究室 (宇宙地球科学専攻)

始原的隕石に含まれるコンドルールは、隕石グループごとに特徴的な化学・同位体組成を示す (Schneider et al., 2020)。このことは、各隕石グループの母天体が、グループごとに異なる環境由来のコンドルールの集積を経て形成したことを示唆する。一方、カイバーベルト帶 (>30 AU) を起源とする彗星核には、様々な隕石グループ由来のコンドルールが混在している (Zhang et al., 2024)。コンドルール形成には十分なガス密度が必要であり、一般に原始太陽系円盤の外側領域 (>10 AU) での形成は困難である (e.g., Nagasawa et al., 2014)。したがって、彗星核中のコンドルールの存在は、円盤の内側 (<10 AU) かつ異なる時空間領域で形成したコンドルールがカイバーベルト帶に輸送されたことを示唆する。さらに、原始惑星系円盤内におけるダスト輸送効率はダストのサイズに依存し、サイズの小さいダストであれば円盤ガスと強くカップリングするため、移流拡散によって形成領域から遠方まで輸送される (Birnstiel et al., 2010)。以上より、コンドルールのサイズと同位体組成に着目することで、コンドルールの形成・輸送・母天体への集積過程を統一的に理解できる可能性がある。

本研究では、原始太陽系円盤における固体物質輸送のサイズ依存性と、隕石グループごとに異なるコンドルールの同位体的特徴に着目し、CV 炭素質隕石中ミニコンドルール (直径 <100μm) の酸素同位体比分析を行った。得られた結果を典型サイズのコンドルール (直径 ≥100μm) と比較したところ、両者に顕著な差は認められなかった。以上より、(1) CV 隕石中のコンドルールはサイズに寄らず同様の円盤環境下で形成したこと、(2) 別グループ由來のミニコンドルール成分を含まないことを明らかにした。さらに、乱流拡散に基づくダスト輸送の数値計算 (Stammler and Birnstiel, 2022) を行った結果、これらを満たすには CV 隕石母天体の集積がコンドルール形成後約 50 万年以内に完了していたことが示唆された。

## アングライト隕石 Sahara99555 の $^{10}\text{Be}$ 存在度から探る原始太陽活動度 篠崎裕夢 寺田研究室 (宇宙地球科学専攻)

短寿命放射性核種  $^{10}\text{Be}$  (半減期 139 万年) は、宇宙線などの高エネルギー粒子による核破砕反応によって生成する核種であり、太陽系最古の固体物質である CAI (Ca-Al-rich Inclusion) の分析から初期太陽系に  $^{10}\text{Be}$  が存在したことが明らかとなっている (McKeegan et al., 2000)。 $^{10}\text{Be}$  の生成に寄与した宇宙線源として銀河宇宙線と太陽高エネルギー粒子 (Solar Energetic Particles: SEP) の 2 つが考えられるが、CAI 間に見出された初生  $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$  の変動から、後者による  $^{10}\text{Be}$  生成 (太陽宇宙線起源説) が有力視されている (Gounelle et al., 2013)。この説が正しい場合、初期太陽系における  $^{10}\text{Be}$  の存在度は SEP 量の指標となるため、原始太陽活動度を推定する上で重要な情報となる。

本研究では CAI 形成後約 390 万年に形成 (Ameline et al., 2008) したアングライトの一種である Sahara 99555 に含まれる斜長石、輝石およびかんらん石に対して、CAMECA NanoSIMS 50 を用いた Be および B 測定を行い、Sahara 99555 形成時の  $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$  を推定した。測定から得られた  $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$  は  $(3.0 \pm 5.5) \times 10^{-4}$  ( $2\sigma$ ) であり、Sahara99555 形成後の惑星空間上での銀河宇宙線照射による二次的な同位体変動を補正した場合、Sahara99555 形成時の  $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$  の上限は  $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be} < 8.3 \times 10^{-4}$  と推定される。得られた  $^{10}\text{Be}$  存在度を説明し得る原始太陽の X 線輝度の上限を、SEP による  $^{10}\text{Be}$  生成モデル (Jacquet, 2019) に基づいた数値計算により推定した。アングライト母天体が CAI 形成後 150 万年以内に集積し (Kleine et al., 2012)、その時点で集積領域に存在した全ての  $^{10}\text{Be}$  が母天体に集積したと仮定した場合、原始太陽の X 線輝度は  $< 10^{33}$  erg/s と求まった。若い太陽質量星の X 線輝度の観測値 ( $10^{29-31}$  erg/s; Güdel et al., 2007) との比較より、原始太陽の活動が太陽系進化に与える影響は他の恒星系と同程度もしくはそれ以下であったことを示唆する。

## Chang'E-5 試料 : Pyroxene 組成に基づく月のマグマの圧力-温度条件推定

藤田盛之介 寺田研究室 (宇宙地球科学専攻)

Chang'E-5(嫦娥 5 号)は 2020 年に月の「嵐の大洋」北部、「Em4/P58」と呼ばれる地域に着陸し、レゴリス試料を採取した探査機である(Chen et al., 2023)。アポロ・ルナ試料の火成岩が約 43–31 億年前(Nyquist and Shih, 1992)に形成されたのに対して、嫦娥 5 号試料は 10 億年以上も若い約 20 億年前(Li et al., 2021)に形成されたことを示しており、月の長期的な火山活動を実証した。しかしながらアポロ・ルナ試料に比べ嫦娥 5 号試料は熱源となる放射性元素成分を特別に多くは含んでおらず、その火成活動のメカニズムは不明である(Che et al., 2021, Tian et al., 2021)。これまで嫦娥 5 号試料のソースマグマの圧力-温度プロファイルが調べられてきたが(e.g. Luo et al., 2023)，多種混合レゴリスの平均組成を用いており、粒子個々の起源の情報を落としてしまっている。

そこで本研究では大阪大学に配分された 2 つの嫦娥 5 号試料に対して、レゴリス中の個々の粒子の起源(ソースマグマ)の同定と、粒子ごとのマグマの圧力・温度条件の推定を行った。はじめに EPMA(電子線マイクロアナライザ)を用いて各粒子の Pyroxene(輝石)元素組成の測定を行った。その後、Pyroxene の元素比 Fe#( $=\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})[\text{molar}]$ )、Ti#( $=\text{Ti}/(\text{Ti}+\text{Cr})[\text{molar}]$ ) の傾向とマグマ  $\text{TiO}_2$  濃度の経験則からソースマグマの同定を行った。そして Pyroxene 元素組成と熱力学モデル、経験的モデルに基づいた Clinopyroxene-only 温度圧力計(Putirka et al., 2008)からソースマグマの圧力・温度の推定を行った。その結果、嫦娥 5 号着陸地点(Em4/P58)の主成分となった比較的高い Ti 濃度の玄武岩マグマは  $0.1 \pm 0.2 \text{ GPa}$ ,  $1070 \pm 20^\circ\text{C}$  の条件下で結晶化を始めたことがわかった。一方、レゴリス中に微量に含まれる粒子の起源である Low-Ti 玄武岩マグマは  $0.4 \pm 0.2 \text{ GPa}$ ,  $1130 \pm 10^\circ\text{C}$  を示し、月のより深部かつ高温環境下で結晶化を始めたことがわかった。

## 惑星探査のための、 $1.49\text{ }\mu\text{m}$ 帯 DFB レーザーを用いたキャビティリングダウン分光法によるアンモニア重水素同位体の測定

満田 龍一 寺田研究室（宇宙地球科学専攻）

近年、月南極に存在すると考えられる揮発性物質が注目されており、特にアンモニアは、その同位体比から揮発性物質の供給起源と進化を制約する情報が得られ、生物形成との関連や資源利用の観点から、惑星科学における重要な分子である。これらの揮発性物質を調査するため、我々はキャビティリングダウン分光法(CRDS)を開発した。CRDS は、高反射ミラー( $R \geq 99.995\%$ )を用いて共振光キャビティを形成し、数 km に達する実効光路長を実現する。装置はコンパクトでありながら微量ガス検出に対して高感度であり、また可動する機械部品が少ないため堅牢な手法であることから、惑星探査への応用が期待される。JAXA 主導の LUPEX ミッションは、月極域における水の探査を目的としており、搭載予定の 5cm の CRDS 装置によって、20 ppb の水分を検出可能であることが報告されている。アンモニアは水に対して高い溶解度を持つため、惑星天体内部の同様の環境において水とともに保持される可能性が高い。したがって、水とアンモニアを同時に測定することは科学的に意義が大きい。水とアンモニアの弱い吸収線が重なり合う近赤外域において、CRDS によりこれらの測定が高感度に実施できる。近赤外 CRDS を用いたアンモニアの窒素同位体測定は実証されており、本研究では重水素置換したアンモニアの同位体種に着目する。しかし、アンモニアの重水素置換同位体については、近赤外域の分光データが HITRAN データベースに存在しない。この様なデータは、将来的に惑星環境におけるアンモニアの同位体測定へ CRDS を適用する上で不可欠である。そこで本研究では、重水素置換アンモニア同位体種を含む試料を作製し、フーリエ変換赤外分光法(FT-IR)により同位体比を決定した。さらに、 $1.49\text{ }\mu\text{m}$  の DFB レーザーを用いた CRDS 測定により、近赤外域におけるアンモニアの重水素置換同位体の吸収線を同定し、対応する吸収係数を推定した。

## レゴリスシミュラント粉体の帶電特性

武田晋弥 寺田研究室（宇宙地球科学専攻）

月面表層のレゴリスは、宇宙放射線や太陽プラズマの影響により帶電しており、昼側では約 5~10 V、夜側では約 -50~ -200V に達し、レゴリス中の深さ約 1m においても帶電が生じている可能性が報告されている。このような電場環境下では、帶電した粒子は電場の影響を受けて浮遊し、その挙動が変化すると考えられる。これまで浮遊粒子としては主にレゴリスダストが知られてきたが、微細な氷結晶が帶電した場合にも、同様に電場の影響を受ける可能性がある。また、近年の観測により、月極域の永久影領域 (PSR) において水分子が氷として安定的に存在する可能性が示されており、氷を含むレゴリス粉体の帶電特性を理解することが重要な課題となっている。しかし、レゴリスを構成する鉱物種の違いや、着氷形態の違いが帶電挙動に与える影響については、十分に理解が進んでいない。

そこで本研究では、レゴリスを構成する代表的な鉱物種ごとの帶電傾向を明らかにすることを目的とした(I) レゴリスシミュラント粉体の対 Teflon との摩擦帶電実験と、氷を含むレゴリス粉体の帶電特性を評価する(II) 着氷レゴリスシミュラント粉体の強制帶電実験の二種類の実験を実施した。(I) では、物質の摩擦帶電特性を表す指標である摩擦帶電列の観点から、鉱物種ごとの帶電極性および帶電量の違いを議論し、特に Anorthosite では他鉱物試料と比較して約 2 倍の帶電量( $9.75 \pm 1.05 (\mu\text{C}/\text{cm}^2)$ )が発生することが確認された。さらに(II) では、着氷鉱物種ごとの帶電特性に加え、氷の存在形態や表面積が帶電量に与える影響について定量的な評価を行い、蒸着型氷では成長過程に伴う表面積の増大が保持電荷量の増加に寄与することが示された。

本研究で得られた知見は、月面環境におけるレゴリス粉体の帶電挙動を理解する上で重要であり、将来的な月面での帶電現象の定量的予測などに繋がることが期待される。

## レーザーポストイオン化 SNMS を用いたアパタイトの Pb-Pb 同位体分析法の開発

松本匡能 寺田研究室（宇宙地球科学専攻）

二次イオン質量分析計(SIMS)は、地球外物質の U-Pb 年代分析において最も高い空間分解能を有する装置とした広く用いられてきた。一方、SIMS での U-Pb 年代分析のためには 5 $\mu\text{m}$  以上の粒径が要求され、リュウグウや嫦娥 5 号サンプルリターン試料などより微小な鉱物が多い試料の測定は困難である。これらの試料で U-Pb 年代分析を行うためには、より高い空間分解能で分析可能な装置が必要である。

1 $\mu\text{m}$  スケールでの U-Pb 年代分析の実現を目指し、レーザーポストイオン化 SNMS; MULTUM-SNMS の開発が進められてきた。本装置は最小 4nm に集光可能な Ga-FIB でスペッタした中性粒子を、フェムト秒レーザーを用いてポストイオン化し飛行時間型質量分析計 (MULTUMII) で分析する。フェムト秒レーザーによるポストイオン化は Ga-FIB でのスペッタイオンに対して 10000 倍のイオン収量を達成しており (Terada et al. 2016)、高空間分解能での U-Pb 年代分析の実現が期待される。

本研究では MULTUM-SNMS を用いて、地球産の標準アパタイト、天然アパタイト、および月隕石中のアパタイトを 2 $\mu\text{m}$  のビーム径でスポット分析を行った。装置特性として 1 次イオンビームが測定領域周辺もスペッタしてしまうこと、および試料表面にコーティング剤が残存し装置由来の Pb として検出されることを見出し、試測定で 50% 以上あった装置由来の Pb による影響を軽減した。そのうえでも地球産のアパタイトでは装置由来の Pb と区別しきれなかったものの、月隕石アパタイトで比較的濃度の高い  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  比は SIMS での先行研究(10-20 $\mu\text{m}$  スポット)と同等の精度での測定を達成した。これにより、本装置が約 1/50 以下のスポット径から SIMS と同じ精度での Pb 同位体分析を実現する可能性があると示された。