



OSAKA UNIVERSITY



OSAKA UNIVERSITY

School of Science

Graduate School of Science

2022 年度
大阪大学大学院理学研究科
物理学専攻・宇宙地球科学専攻
修士論文発表会予稿集

令和5年2月8日(水)・9日(木)

目次

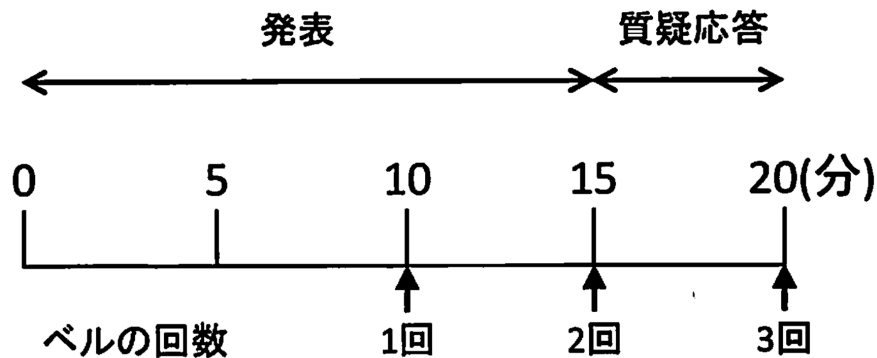
● 連絡事項	4
● タイムテーブル	6
● 予稿	
・物理学専攻 素粒子・原子核グループ (2月8日)	9
・物理学専攻 素粒子・原子核グループ (2月9日)	18
・物理学専攻 物性グループ (2月8日)	25
・物理学専攻 物性グループ (2月9日)	34
・宇宙地球科学専攻 (2月8日)	39
・宇宙地球科学専攻 (2月9日)	50

[連絡事項]

発表について

- 発表時間

ひとりあたりの持ち時間は、質疑応答5分を含めて20分です。



- 発表スライド・機器の準備

各セッション(休憩から休憩までの間)で1台のパソコンに発表ファイルをまとめて入れておいてください。発表プログラムの遅延を避けるため、セッション内でのパソコンの入れ替えは行わないでください。

また、プロジェクターのセッティングは発表前の休憩時間に行ってください。

判定会議について

判定会議

日時：2月10日(金) 10:00～

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8日(水)、9日(木)の最初のタイムキーパーの方へ
講義室の解錠、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8日(水)の最後のタイムキーパーの方へ
8日(水)の発表会終了後、9日(木)の最初のタイムキーパーに
 - ・ コールベル
 - ・ レーザーポインタ
 - ・ タイムキーパー用の修論予稿集を紙袋に入れて渡してください。
- 2月9日(木)の最後のタイムキーパーの方へ
9日(木)の発表会終了後、
 - ・ コールベル
 - ・ レーザーポインタ
 - ・ タイムキーパー用の修論予稿集を紙袋に入れて物理学専攻事務室(H408)に返却してください。

緊急連絡先

- 物理学専攻事務室(H408) :
續木佐知子 (TEL.06-6850-5377, Ext. 5377)
- 物理学専攻(山中研) :
荒木田陸斗、川田悠統、久郷莉奈、柴田哲平 (Ext. 5359)
- 宇宙地球科学専攻(寺田研) :
秋吉遙己、大西亮、陣内創 (Ext. 5498)

素粒子・原子核グループ(会場:H701)

2月 8日(水)

座長	開始時間	学生氏名	指導教員	ページ	進学	主査	副査	副査	副査	タイムキーパー
青井	10:40	新名 嶺偉	民井 淳	10		民井 淳	大田 晋輔	福田 光順		川田悠統(山中研)
	11:00	金子 悠仁	保坂 淳	10		保坂 淳	浅川 正之	石井 理修		
	11:20	榊原 蒼司	兼村 晋哉	11		兼村 晋哉	大野木 哲也	柳生 慶		
	11:40	鄧 暁龍	兼村 晋哉	11		兼村 晋哉	佐藤 亮介	田中 実		
		休憩								
有川	13:00	藤田 侑葵子	山中 卓	12		山中 卓	南條 創	上野 一樹		小島陸(RCNP理論部)
	13:20	荒久田 周作	山中 卓	12		山中 卓	南條 創	吉田 斉		
	13:40	小野 啓太	山中 卓	13	○	山中 卓	南條 創	中野 貴志		
	14:00	北川 歩	山中 卓	13	○	山中 卓	南條 創	青木 正治		
		休憩								
山中	14:40	木村 容子	福田 光順	14		福田 光順	川畑 貴裕	阪口 篤志	三原 基嗣	平岩義寛(原子核理論研究室)
	15:00	高山 元	福田 光順	14	○	川畑 貴裕	民井 淳	福田 光順		
	15:20	戸田 匡哉	阪口 篤志	15	○	川畑 貴裕	野海 博之	阪口 篤志		
	15:40	徳田 恵	阪口 篤志	15		阪口 篤志	川畑 貴裕	吉田 斉		
		休憩								
保坂	16:20	氷見 香奈子	川畑 貴裕	16		川畑 貴裕	大田 晋輔	古野 達也		宇田隆佑(川畑研)
	16:40	辻 聖也	川畑 貴裕	16		川畑 貴裕	吉田 斉	古野 達也		
	17:00	吉岡 篤志	吉田 斉	17		吉田 斉	川畑 貴裕	民井 淳		
	17:20	阪井 俊樹	吉田 斉	17		吉田 斉	川畑 貴裕	南條 創		
		休憩								

素粒子・原子核グループ(会場:H701)

2月 9日(木)

座長	開始時間	学生氏名	指導教員	ページ	進学	主査	副査	副査	副査	タイムキーパー
川畑	10:40	YUBO WANG	藤岡 慎介	19	○	藤岡 慎介	兼松 泰男	有川 安信		久郷莉奈(山中研)
	11:00	前川 珠貴	藤岡 慎介	19		藤岡 慎介	山中 卓	有川 安信		
	11:20	芦川 涼	浅川 正之	20		浅川 正之	大野木 哲也	菊池 誠		
	11:40	柳川 耀平	浅川 正之	20		浅川 正之	石井 理修	赤松 幸尚		
		休憩								
阪口	13:00	三好 剛	梅原 さおり	21		梅原 さおり	川畑 貴裕	嶋 達志		荒木田陸斗(山中研)
	13:20	山本 勇次	野海 博之	21		野海 博之	民井 淳	石川 貴嗣	白鳥 昂太郎	
	13:40	宮滝 雅己	青木 正治	22	○	青木 正治	川畑 貴裕	上野 一樹		
	14:00	若林 寛之	青木 正治	22		上野 一樹	青木 正治	野海 博之		
		休憩								
青木	14:40	池上 魁	西岡 辰磨	23		西岡 辰磨	佐藤 亮介	深谷 英則		林双葉(川畑研)
	15:00	坂川 裕則	西岡 辰磨	23		西岡 辰磨	大野木 哲也	田中 実		
	15:20	嶋守 聡一郎	西岡 辰磨	24	○	西岡 辰磨	大野木 哲也	山口 哲		

2月10日(金)
10:00-12:00

判定会議:H701 (ハイブリッド形式)
(教授, 准教授, 及び審査委員の助教 全員出席)

物性グループ(会場:D403)
2月8日(水)

座長	開始時間	学生氏名	指導教員	ページ	進学	主査	副査	副査	タイムキーパー
工藤	9:00	井川 翔太	兼松 泰男	26		兼松 泰男	豊田 岐聡	松野 丈夫	須崎洋岳(工藤研)
	9:20	JIANZHONG WANG	兼松 泰男	26	○	兼松 泰男	豊田 岐聡	木村 真一	
	9:40	中田 悠介	浅野 建一	27		浅野 建一	越野 幹人	黒木 和彦	
	10:00	MINH NHAT LY	千徳 靖彦	27	○	千徳 靖彦	佐野 孝好	越野 幹人	
	休憩								
黒木	10:40	廣瀬 有経	松野 丈夫	28		松野 丈夫	萩原 政幸	上田 浩平	三川基(萩原研)
	11:00	森本 鉄郎	松野 丈夫	28		松野 丈夫	新見 康洋	上田 浩平	
	11:20	大星 和毅	新見 康洋	29		新見 康洋	花咲 徳亮	木村 真一	
	11:40	中村 瞭弥	新見 康洋	29	○	新見 康洋	工藤 一貴	越野 幹人	
	休憩								
松野	13:00	黒川 開斗	新見 康洋	30		新見 康洋	宮坂 茂樹	塩貝 純一	兵頭周(浅野研)
	13:20	JEON SEOKTAM	菊池 誠	30		吉野 元	菊池 誠	湯川 諭(宇宙)	
	13:40	神田 哲汰	大岩 顕	31		大岩 顕	新見 康洋	藤田 高史	
	14:00	岸大路 泰宏	工藤 一貴	31		工藤 一貴	塩貝 純一	宮坂 茂樹	
	休憩								
越野	14:40	藤井 隆弘	工藤 一貴	32		工藤 一貴	松野 丈夫	中島 正道	厚美竜二(松野研)
	15:00	高木 健輔	工藤 一貴	32		工藤 一貴	新見 康洋	越智 正之	
	15:20	湯浅 直輝	花咲 徳亮	33		花咲 徳亮	松野 丈夫	酒井 英明	

物性グループ(会場:D403)
2月9日(木)

座長	開始時間	学生氏名	指導教員	ページ	進学	主査	副査	副査	タイムキーパー
萩原	10:40	谷 天太	越野 幹人	35	○	越野 幹人	木村 真一	酒井 英明	前田将輝(新見研)
	11:00	山本 和輝	越野 幹人	35	○	越野 幹人	花咲 徳亮	越智 正之	
	11:20	梶谷 拓矢	黒木 和彦	36		黒木 和彦	松野 丈夫	越智 正之	
	11:40	堀内 健司	黒木 和彦	36		黒木 和彦	花咲 徳亮	越智 正之	
	休憩								
浅野	13:00	立川 慎吾	木村 真一	37		木村 真一	工藤 一貴	渡邊 浩	杉原弘基(木村研)
	13:20	YITONG CHEN	木村 真一	37	○	木村 真一	松野 丈夫	中村 拓人	
	13:40	山本 智士	木村 真一	38		木村 真一	兼松 泰男	渡邊 浩	
	14:00	吉田 悠人	木村 真一	38		木村 真一	渡邊 純二	鳴海 康雄	

2月10日(金)
10:00-12:00

判定会議:H701 (ハイブリッド形式)
(教授, 准教授, 及び審査委員の助教 全員出席)

宇宙地球科学専攻(会場:F608)
2月8日(水)

座長	開始時間	学生氏名	指導教員	ページ	進学	主査	副査	副査	副査	副査	タイムキーパー
近藤	9:00	加藤 礼也	佐々木 晶	40		佐伯 和人	佐々木 晶	桂木 洋光			小山真矢 (佐々木研究室)
	9:20	浅 明子	佐々木 晶	40		佐々木 晶	木村 淳	近藤 忠			
	9:40	山口 朋恵	佐々木 晶	41		佐々木 晶	木村 淳	近藤 忠			
	10:00	高橋 華乃子	佐々木 晶	41		佐伯 和人	佐々木 晶	山中 千博			
	休憩										
桂木	10:40	鶴海 達大	佐々木 晶	42		佐々木 晶	木村 淳	住 貴宏			増田清司(佐々木研究室)
	11:00	盛満 眞一	佐々木 晶	42		佐々木 晶	佐伯 和人	横田 勝一郎			
	11:20	前田 亘佑	中井 光男	43		中井 光男	松本 浩典	坂和 洋一			
休憩											
寺田	12:40	戸田 大凱	住 貴宏	43		住 貴宏	小高 裕和	鈴木 大介			友善瑞雄 (住研究室)
	13:00	丹羽 宏輔	住 貴宏	44		住 貴宏	井上 芳幸	鈴木 大介			
	13:20	岡村 有紗	住 貴宏	44		住 貴宏	井上 芳幸	増田 賢人			
	13:40	山 響	住 貴宏	45	○	住 貴宏	松本 浩典	佐伯 和人			
	14:00	松本 翔	住 貴宏	45		住 貴宏	佐伯 和人	増田 賢人			
休憩											
波多野	14:40	杉浦 聖也	寺田 健太郎	46		植田 千秋	寺田 健太郎	久富 修			福本健 (桂木研究室)
	15:00	瀧上 駿	寺田 健太郎	46		山中 千博	寺田 健太郎	佐伯 和人			
	15:20	嶋本 朱那	桂木 洋光	47		桂木 洋光	近藤 忠	廣野 哲朗(大阪公立大)			
	15:40	矢野 弘道	桂木 洋光	47		桂木 洋光	佐伯 和人	廣野 哲朗(大阪公立大)			
	16:00	永野 優大	桂木 洋光	48		久富 修	桂木 洋光	山中 千博			
休憩											
住	16:40	種子 文也	桂木 洋光	48		桂木 洋光	波多野 恭弘	山本 憲			島田 顕生 (波多野研究室)
	17:00	各務 衣月	波多野 恭弘	49		波多野 恭弘	湯川 諭	山本 憲			
	17:20	村上 朔	波多野 恭弘	49		波多野 恭弘	湯川 諭	桂木 洋光			

宇宙地球科学専攻(会場:F608)
2月9日(木)

座長	開始時間	学生氏名	指導教員	ページ	進学	主査	副査	副査	副査	副査	タイムキーパー
佐々木	9:00	大野 正和	近藤 忠	51		近藤 忠	西 真之	佐々木 晶			神垣遼 (近藤研究室)
	9:20	司 今	近藤 忠	51		近藤 忠	西 真之	大高 理			
	9:40	橋本 佳依	近藤 忠	52		近藤 忠	西 真之	佐々木 晶			
	10:00	ZHANG WEI	桂木 洋光	52		桂木 洋光	佐々木 晶	山本 憲			
	10:20	保田 彪賀	桂木 洋光	53		桂木 洋光	久富 修	湯川 諭			
休憩											
長峯	11:00	大出 優一	松本 浩典	53		松本 浩典	野田 博文	横田 勝一郎			青柳美緒 (松本研究室)
	11:20	鴨川 航	松本 浩典	54		松本 浩典	小高 裕和	鈴木 大介			
	11:40	佐藤 淳矢	松本 浩典	54		松本 浩典	小高 裕和	井上 芳幸			
	12:00	袴田 知宏	松本 浩典	55	○	松本 浩典	小高 裕和	高棹 真介	住 貴宏		
	12:20	飯川直樹	桂木 洋光	55	○	桂木 洋光	波多野 恭弘	佐伯 和人	久富 修	湯川 諭	
休憩											
松本	13:40	海野 真輝	長峯 健太郎	56		長峯 健太郎	高棹 真介	横田 勝一郎			山田知也(長峯研究室)
	14:00	片山 諒介	長峯 健太郎	56		長峯 健太郎	井上 芳幸	増田 賢人			
	14:20	柴田 健吾	長峯 健太郎	57		井上 芳幸	高棹 真介	横田 勝一郎			
	14:40	戸丸 一樹	長峯 健太郎	57	○	長峯 健太郎	松本 浩典	井上 芳幸			
	15:00	山本 凌也	長峯 健太郎	58	○	長峯 健太郎	住 貴宏	高棹 真介	野田 博文		

2月10日(金) 判定会議:H701(ハイブリッド形式)
10:00-12:00 (教授, 准教授, 及び審査委員の助教 全員出席)

物理学専攻
素粒子・原子核グループ
会場：H701
2月8日（水）

$^{12,13}\text{C}$ の光核反応における崩壊分岐比の測定

新名 嶺偉 民井研究室(物理学専攻)

地球上では、 10^{20}eV を超える超高エネルギー宇宙線が観測されている。この宇宙線は最近の研究で銀河系外から飛来していることや飛来してくる粒子は陽子より重く鉄より軽い核種であることが示唆されている。これを超高エネルギー宇宙線のシミュレーションによく使用する計算コードによる理論計算と観測の両面からどのような核種分布やエネルギー分布の変化をし伝播するかを解明しようとしている。そのためには銀河系外で起こる宇宙マイクロ波背景放射などによって生じる光子との反応である光核反応の精密な理論モデルが必要となる。

今回調べる ^{12}C の光核反応における α 放出チャンネルはアイソスピン選択則上では禁止される反応ではあるので抑制されるはずであるが理論予測によってばらつきがある。また、この反応は質量数を4も失う反応であるためエネルギー損失も大きく、シミュレーションには重要な反応である。グラウンドライデンと Si 検出器アレイ SAKRA を用いて、陽子を用いたクーロン励起によって $^{12,13}\text{C}$ の荷電粒子崩壊分岐比を測定し、現在の理論予測と比較する。最終的に測定データから質量数の小さい原子核の光核反応の理解を深めるとともに理論予測の精度を向上させ、超高エネルギー宇宙線のシミュレーションの精度向上に貢献する予定である。

ホログラフィックQCDによる電磁遷移振幅の研究

金子 悠仁 原子核・クォーク核理論グループ(物理学専攻)

「Ads/CFT対応」や「ゲージ/重力対応」などと呼ばれるホログラフィー原理を用いてQCDの非摂動領域の計算を試みる理論をホログラフィックQCDという。中でも、酒井・杉本模型はより現実のQCDに近い理論を再現することに成功しており、ハドロンの静的性質のみならず、状態の遷移を含むような動的性質の研究にも用いられてきた。

これまでの酒井・杉本模型を用いたハドロン共鳴状態の研究ではクォーク模型などから大きな改善が見られてきた。また、同じハドロンをソリトン解として記述する模型であるSkyrme模型からも適用範囲、計算結果共に改善しており、ハドロン共鳴状態の系統的な研究として酒井・杉本模型は有効な模型であると言える。これらのことから、本研究ではクォーク模型・Skyrme模型の双方が扱うことを困難としている $N(1535)$ の電磁遷移振幅の計算を行った。

本発表では、酒井・杉本模型について簡単な導入を行い、オリジナルの研究結果である $N(1535)$ の電磁遷移振幅の計算を主題としてハドロンのいくつかの動的性質の研究について紹介する。具体的にはローパー共鳴や $N(1535)$ からパイオンあるいは光子を放出して核子へと遷移する過程についての計算結果である。 $N(1535)$ の電磁遷移振幅の計算結果は、これまでの他の過程に対する結果に比べると実験データを上手く再現できていないようにも見えることから、今後の展望についても言及する。

Left-Right symmetric model におけるヒッグスセクターの研究

榎原 蒼司 素粒子論研究室 (物理学専攻)

標準模型を超える理論の1つとして、本発表では Left-Right Symmetric Model(LRSM) と呼ばれる理論を取り扱う。この理論は、標準模型に含まれる相互作用を統一する大統一理論 (Grand Unification Theory; GUT) と深く関連しており、標準模型では説明できない現象についても説出来得る事が分かっている。その中でも、本発表では LRSM のヒッグスポテンシャルと湯川セクターについて焦点を当てて議論していく。特にこれらのセクターを解析する上で two higgs doublet model(2HDM) と比較を行うことで、その類似点や相違点についても見ていく。

また、これらの解析によって LRSM にはフレーバーに関する部分に特徴的な構造を持つことがわかる。そのため、フレーバー実験のデータを用いて今回取り扱う LRSM が理論にどういった制限を受けるのかについても調べた。

Lepton Rare Decays in Massless Dark Photon Model

Xiaolong Deng Particle Physics Theory Group (Department of Physics)

One of the minimal extensions of the Standard Model of particle physics is the U(1) extension in the gauge sector. Among several U(1) extensions, we examine the model of massless dark photon (denoted by γ') and investigate several leptonic rare processes caused by higher-dimensional operators of dark photon. We discuss lepton family violating two-body decays, $\mu \rightarrow e + \gamma'$, which is constrained by the TWIST experiment, and $\tau \rightarrow \ell + \gamma'$, as well as three-body decays, $\mu \rightarrow 3e$ and $\tau \rightarrow \ell\ell'\ell'$. We present constraints on the relevant coupling constants. We also calculate the cross sections of $\mu^+e^- \rightarrow \mu^-e^+$ and $\mu^+e^- \rightarrow \gamma\gamma'$ at μ TRISTAN.

高輝度 LHC ATLAS 実験で使うシリコンピクセル検出器量産時の外観検査用ソフトウェアの開発

藤田 侑葵子 山中研究室 (物理学専攻)

ヨーロッパにある CERN の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) は、ルミノシティを向上させる高輝度 LHC へのアップグレードが行われる。これに伴い陽子陽子衝突の際の飛跡が増え放射線量も増大するため、ATLAS 検出器の内部飛跡検出器は全て新型の検出器に入れ替える。この新型検出器は世界中で約 10000 個生産し、一つ一つ品質管理試験をする。品質管理試験の項目のうち外観検査は、検出器の写真を撮り拡大して異常の有無を確認する検査である。外観検査は量産の各工程で写真を目視して行うため、欠陥を試験者に効率よく確実に見つけてもらうことが重要である。そのため、本研究では外観検査用グラフィカルユーザーインターフェイス (GUI) の改善や欠陥を自動判定するツールの開発を行い、外観検査の効率性と正確性の向上を図った。

外観検査用 GUI は先行研究で開発されていたが、プロトタイプ検出器のみに対応しており最終版の検出器には未対応であった。また、検査画面で部品の名前が確認しづらかったり、チェックリストの名前がこのソフトウェア独自のものであったりと不便な部分があった。これらの問題を解消し、外観検査用 GUI を改善した。

また、SMD は一つの検出器に 160 個以上もあり、一つ一つ目視で確認していくと時間がかかり見落としも起きやすい。そこで、目視確認の前に写真の SMD の位置の色情報から欠損を判定するツールを開発した。このツールは SMD と基板の色とを区別し、基板と色が同じ部分を SMD の欠損として判定する。性能検証の結果、表面が綺麗な検出器では SMD と基板を区別できるが、汚れ等があった場合には欠損を判定できなかった。

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 閾値調整における目標閾値からの乖離

荒久田 周作 山中 卓研究室 (物理学専攻)

ATLAS 実験は陽子・陽子衝突型加速器 (LHC) を用い、ヒッグス粒子の性質の研究や標準理論の枠組みを超える物理の探索をしている。研究の更なる発展のため、LHC ではビーム輝度の向上が計画されている (HL-LHC 計画)。それに伴い ATLAS 実験では、最内層のシリコンピクセル検出器をアップグレードする。シリコンピクセル検出器は多数の検出器モジュールで構成される。1つの検出器モジュールはセンサー、フレキシブル基板、4つの専用の集積回路 (ASIC) を持つ。センサーと ASIC は同様に 50 μm 角でピクセル化されている。1つの ASIC は約 15,000 個のピクセルを持ち、それぞれのピクセルが荷電粒子を検出する。ピクセルは、センサーからの信号、あるいは ASIC で生成されるテスト信号の入力に対し、閾値を超えるとヒットと判定して、その情報をデジタル信号として後段に送り出す。この閾値は ASIC 内部で保存されるレジスタ値を変更することによって設定できる。閾値は信号の電荷量に相当する閾値に設定したい。目標閾値に調整するには、対応する電荷量のテスト信号を入力する。この入力回数に対するヒット数の比 (ヒット率) の値を基準にしてレジスタ値を変更する。入力電荷量を変化させた際のヒット率の推移を用いて、閾値に対応する電荷量を測定する。また、テスト信号を送る際、同時に動作させるピクセル数を指定することができる。実際に閾値を調整・測定したところ、目標閾値と全ピクセルの閾値分布のピーク値の間に乖離があった。さらに、同時に動作させるピクセル数を変化させると閾値分布のピーク値も変化した。本研究の目的は、この閾値の乖離と変化の原因をつきとめることである。そのために、原因の候補を提案し、検証した。

薄膜プラスチックシンチレータを用いた KOTO 実験用荷電粒子検出器の開発

小野 啓太 山中卓研究室 (物理学専攻)

J-PARC KOTO 実験では、中性 K 中間子の稀な崩壊 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を探索している。この崩壊は、CP 対称性を破る崩壊で、崩壊分岐比が 3×10^{-11} と小さく、分岐比の理論的誤差も約 2% と小さい。そのため、新物理に対して感度のある崩壊となっている。

KOTO 実験における背景事象の一つとして、荷電 K 中間子 (K^+) の崩壊がある。この K^+ は、中性ビームの中に、 K_L に対して 2.6×10^{-5} 混在している。この背景事象を削減するために、2020 年にビーム中に新たに 0.5 mm 厚の荷電粒子検出器 (UCV) が設置され、現在は荷電 K 中間子背景事象を 1/13 まで削減できている。しかし、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 信号が 1 事象期待される感度 (標準理論感度) に対しては、更なる削減が必要である。

本研究では、UCV に代わる、新しい荷電粒子検出器 (FilmUCV) を開発した。目標は、UCV に比べ、低物質で、高感度な検出器にすることである。FilmUCV では、0.2 mm 厚の薄膜プラスチックシンチレータを用いる。薄膜シンチレータ内を伝播するシンチレーション光の読み出しは、減衰が大きいため、光量を期待できない。そこで、薄膜シンチレータの表面で全反射せず外に漏れ出た光を、12 μ m 厚のアルミ蒸着フィルムでできた集光機構で集光し、光電子増倍管で読み出して光量を獲得する。本研究では、検出器の集光機構を設計し、実機検出器を製作した。その後、電子ビームを用いてその性能を評価し、最小電離粒子 1 個の貫通あたり 20 光電子の獲得と荷電粒子検出効率 99.9% を達成した。この結果、FilmUCV を設置することで荷電 K 中間子背景事象を 1/1000 まで削減でき、標準理論感度における荷電 K 中間子背景事象数は 0.015 事象となる。

J-PARC KOTO 実験の低物質荷電粒子検出器に用いる 光電子増倍管の電圧供給基板部の開発

北川 歩 山中卓研究室 (物理学専攻)

茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) を用いた KOTO 実験は、CP 対称性を破る稀崩壊 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を探索している。標準理論では、この崩壊の崩壊分岐比は 3×10^{-11} と予測されているが、これまで行われた実験では観測されていない。2016~2018 年に取得した物理データの解析の中で、荷電 K 中間子 (K^\pm) が最大の背景事象源であった。我々は K^\pm の崩壊による背景事象を削減するため、KOTO 検出器上流部、ビームライン上の真空中に設置する荷電粒子検出器 UCV (Upstream Charged Veto) を開発した。UCV は次のようなデザインである。まず、厚さ 0.2 mm、160 mm 角のプラスチックシンチレータを用いる。シンチレータ内部で全反射されず漏れ出たシンチレーション光を、厚さ 12 μ m のアルミ蒸着フィルムで反射集光し、ビーム外に置かれた 14 本の光電子増倍管 (PMT) で読み出す。本研究では、UCV に用いる PMT の電圧供給基板部を開発した。PMT の基板部には高電圧が印加されているため、真空中で放電や温度上昇を起こし、PMT の破損につながる恐れがある。そこで、放電や温度上昇を防ぎ、真空中で安定に使用できる基板部と冷却方法を開発した。また、物理ランにおいて、UCV には 3 MHz で粒子がヒットする。このような高レートでは PMT の増倍率が変化し、UCV の検出効率が低下する恐れがある。開発した基板部を用いて、物理ランにおいて増倍率が安定であることを保証した。

β線検出核磁気共鳴法を利用したイメージング法の開発

木村 容子 川畑研究室(物理学専攻)

我々の研究室では、β線検出核磁気共鳴(β-NMR)法を用いて核物理や物性研究を行っている。β-NMR法とは、スピン偏極核のβ線放出角度分布の非対称性を利用してNMRを観測する方法である。本研究ではβ-NMR法を用いて、試料物質の各位置でのNMR信号を画像化するイメージング(β-MRI)法の開発を行い、様々な元素によるMRIの実現を目指している。シンチレーションファイバーを平面状に隙間なく並べて製作したβ線位置検出器を用いて、図1の概念図に示すようにβ線をトラッキングすることにより、試料物質中に入射したβ線放出核の位置を特定できるようにした。開発した手法は量子医科学研究所 HIMAC にて、スピン偏極 RI ビーム $^{12}\text{B}(I=1, T_{1/2}=20\text{ ms})$ を用いて性能試験を行った。その結果、 ^{12}B ビームの核磁気共鳴画像の取得に成功した。

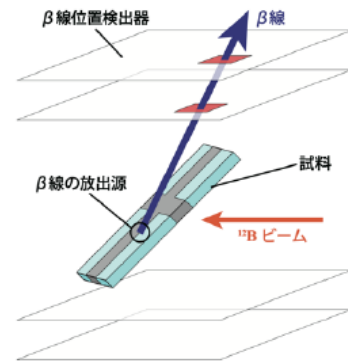


図1. β-MRI法の概念図

軽核同位体チェーンにおける荷電変化断面積と陽子分布半径の新導出法

高山 元 川畑研究室 (物理学専攻)

中高エネルギーにおける原子核衝突の反応断面積から核物質半径を導出する方法は確立している。さらに、我々は荷電変化断面積も同時測定し陽子分布半径を導出することで、核物質半径との差から中性子分布半径も導出しようと試みている。本研究では、陽子分布半径が既知であるLi, Be同位体の複数の標的に対する荷電変化断面積を測定し、陽子分布半径との対応関係を調べた。そして、荷電変化断面積の標的依存性から陽子分布半径を反映しない荷電変化反応チャンネルを定量的に評価し、荷電変化断面積から差し引くことで、陽子分布半径を導出する方法を考案した。

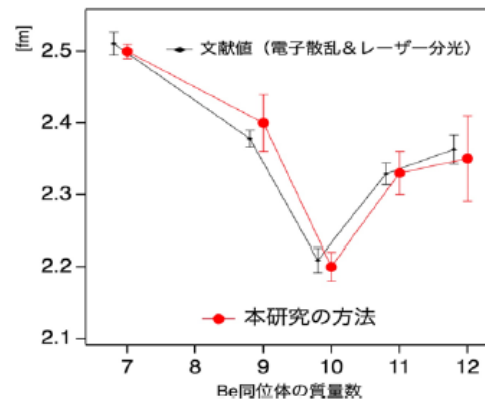


図1: 新手法によって焼き直した陽子分布半径

J-PARC におけるチャームバリオン分光実験用 リングイメージングチェレンコフ検出器の開発

戸田 匡哉 原子核実験研究室 (物理学専攻)

我々は、J-PARC ハドロン実験施設の高運動量ビームラインにおいてチャームバリオン分光実験を計画している。実験では 20 GeV/c の π^- ビームを用いて、 $\pi^- + p \rightarrow D^{*-} + Y_c^{*+}$ 反応でチャームバリオンを生成し、 D^{*-} の崩壊粒子 (K^+ や π^-) を捉えることで欠損質量からチャームバリオンを同定する。崩壊粒子の K^+ や π^- は 2 - 16 GeV/c の広い運動量を持つため、粒子識別を行うためのリングイメージングチェレンコフ (RICH) 検出器を開発した。

RICH 検出器は低運動量領域と高運動量領域の識別のための 2 種類の輻射体 (エアロゲルとガス)、球面反射鏡、光センサーによる検出面で構成される。実機と同じ構成要素のうち、低運動量領域の粒子識別に輻射体として用いるエアロゲル (屈折率 1.04)、曲率半径 3 m の球面反射鏡、集光用のライトコーンを取り付けた Multi-Pixel Photon Counter(MPPC) を用いた検出面で構成したテスト機を製作した。東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) で 0.8 GeV/c の陽電子を用いてテスト実験を行った。実験では性能評価のために、MPPC の動作電圧、エアロゲルの厚さなどを変えながら、エアロゲルによるチェレンコフ光のリングイメージを測定し、チェレンコフ角を導出した。本発表では、テスト機の測定で得られたチェレンコフ角の角度分解能の性能評価について報告し、テスト実験の結果を踏まえた実機的设计について議論する。

J-PARC におけるチャームバリオン分光実験用 リングイメージングチェレンコフ検出器の粒子識別性能評価

徳田 恵 川畑研究室 (物理学専攻)

我々は、J-PARC 高運動量ビームラインにおいてチャームバリオン分光実験 (J-PARC E50 実験) を計画している。実験では、液体水素標的に 20 GeV/c の π^- ビームを入射し、 $\pi^- + p \rightarrow D^{*-} + Y_c^{*+}$ 反応によってチャームバリオンの励起状態 (Y_c^{*+}) を生成する。 D^{*-} の崩壊先である π^- , K^+ と π^- ビームの四元運動量を測定することでミッシングマス法により Y_c^{*+} の質量を測定する。 D^{*-} の崩壊粒子は 2-16 GeV/c の広い運動量領域をもつ。この広い運動量領域で粒子識別を行うためにリングイメージングチェレンコフ (RICH) 検出器の開発を行った。

RICH 検出器では、漏れ磁場の影響から光検出器として Multi-Pixel Photon Counter(MPPC) を使用する。MPPC の小さい面積の受光面で 2m × 1m の検出面を覆う必要があるため、チェレンコフ光を集光するためのコーン型ライトガイドを開発した。コーン型ライトガイドを使用したプロトタイプ検出器の性能評価のため、東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) においてテスト実験を行った。0.8 GeV/c の陽電子を屈折率 1.04 のエアロゲルに照射して発生したチェレンコフ光を、曲率半径 3m の球面鏡で反射させ、コーン型ライトガイドと MPPC を使用してリングイメージを測定した。テスト実験の解析からコーンの集光性能や暗電流の影響を評価し、Geant4 によるシミュレーションに実測値を反映させることで、実機における $\pi/K/p$ の粒子識別性能を評価した。

大型アクティブ標的 MAIKo+を用いた $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}(0_2^+)$ 散乱断面積の測定

水見 香奈子 川畑研究室 (物理学専攻)

高密度環境下におけるトリプルアルファ反応率を評価するには、中性子との非弾性散乱により ^{12}C における 0_2^+ 励起状態が基底状態へと脱励起する断面積を決定する必要がある。 ^{12}C の励起状態を標的とすることは困難であるため、逆反応である ^{12}C の基底状態が中性子との非弾性散乱により 0_2^+ 状態へ励起される反応の断面積を測定し、詳細釣り合いの原理を用いて脱励起の断面積を決定する。我々は、炭素標的と飛跡検出器を兼ねるアクティブ標的を用いて、 0_2^+ 状態から放出される3つの α 粒子の飛跡を測定する計画である。

2020年に大阪大学の OKTAVIAN 施設において、既存の MAIKo アクティブ標的を用いたテスト実験を行い、14 MeV の中性子と ^{12}C の非弾性散乱を測定した。測定データから3つの α 粒子の飛跡を再構成し、不変質量法を用いて 0_2^+ 状態に励起された事象を同定することで断面積を決定した。この断面積が先行研究の結果と一致することを確認し、この測定手法が有効であることを確認した。

しかし、 0_2^+ 状態へ励起したと同定できた事象数が少なく、収量についての統計誤差が大きかった。そこで、収量増加のために MAIKo の有感領域を各辺約3倍に拡張した、 $30.7 \times 30.7 \times 30.0 \text{ cm}^3$ の大型アクティブ標的 MAIKo+を開発した。シミュレーションによると、MAIKo+を用いることで収量が約10倍に増大すると期待できる。MAIKo+を用いて14 MeV の中性子と ^{12}C の非弾性散乱を測定するテスト実験を再び OKTAVIAN 施設において実施し、高精度で $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}(0_2^+)$ 反応の断面積を決定できるかを検討した。

α 非弾性散乱を用いた Hoyle 状態の γ 崩壊確率測定

辻 聖也 原子核実験研究室 (物理学専攻)

^4He 原子核が α 粒子を逐次捕獲して ^{12}C を合成するトリプルアルファ反応は、宇宙の元素合成過程において重要な反応の一つである。この反応では主に、Hoyle 状態と呼ばれる ^{12}C の励起状態 ($E_x = 7.65 \text{ MeV}$) が中間状態として生成される。Hoyle 状態の大半は3つ α 粒子へと崩壊するが、稀に γ 線を放出して脱励起し、 ^{12}C の基底状態が生成される。このため、 ^{12}C の基底状態が γ 線を放出して脱励起する確率 (γ 崩壊幅) は、元素合成過程に置いて重要なパラメータの一つとなっている。近年、この γ 崩壊幅について、広く元素合成計算に用いられてきた文献値を約50%上方修正するという衝撃的な報告が為された。もしこの報告が正しければ、元素合成過程に対して多大な影響を及ぼす。

そこで本研究では、近年の報告を追試するために、 α ビームを ^{12}C 標的に照射し、非弾性散乱の測定を行った。散乱 α 粒子と反跳 ^{12}C を同時に計測することで γ 線を測定することなく Hoyle 状態の γ 崩壊事象を同定することができる。データ解析では、Digitizerを用いて取得した Si 検出器からの出力信号に対して波形解析を行った。この解析によってバックグラウンド事象を取り除き、散乱 α 粒子と反跳 ^{12}C の同時計測事象のイベント数を数え上げ、 γ 崩壊幅を決定した。

CANDLES 実験での ^{208}Tl 起源バックグラウンドの低減

吉岡 篤志 川畑研究室 (物理学専攻)

CANDLES は ^{48}Ca を用いて、ニュートリノを放出しない二重 β 崩壊 ($0\nu\beta\beta$ 崩壊) 事象の探索を行う実験である。CaF₂ 結晶を利用して ^{48}Ca の $0\nu\beta\beta$ 崩壊事象 ($Q_{\beta\beta}=4.3$ MeV) の探索を行っており、重大なバックグラウンド事象として CaF₂ 結晶内に微量に混入されているトリウム系列の不純物に由来した ^{208}Tl の γ 線放出を伴う β 崩壊 ($\beta+\gamma$ 崩壊、 $Q_{\beta}=5.0$ MeV) が存在する。従って、この事象の除去が高感度測定のカギとなる。

この ^{208}Tl の $\beta+\gamma$ 崩壊は、 $^{212}\text{Bi} \xrightarrow{\alpha} ^{208}\text{Tl} \xrightarrow{\beta+\gamma} ^{208}\text{Pb}$ という連続崩壊である為、先発事象と後発事象の波形情報やエネルギー、またその時間差等を用いて識別を行う。特に、先発の α 崩壊について、 α 事象と $\beta(\gamma)$ 事象のシンチレーション光の信号の形の違いを利用した波形弁別 (PSD) によって同定を行っている。しかし、この ^{212}Bi の崩壊には γ 線放出を伴う α 崩壊 ($\alpha+\gamma$ 崩壊) が含まれる為、 γ 線放出を伴わない α 崩壊と波形の特徴の現れ方が違う。そこで、 α 事象と $\beta(\gamma)$ 事象を足し合わせた波形の特徴を再現する人工波形を作成した。

$^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$ 崩壊事象の人工波形作成の為、観測データの中から、 γ 線を放出しない ^{215}Po の α 崩壊事象 ($Q_{\alpha}=7.4$ MeV) と外部起因の ^{208}Tl の γ 線 (2.6 MeV) 事象を選択し、波形の特性を人工的に再現した。続いて、 $\alpha+\gamma$ 崩壊の識別に人工波形を使用する妥当性を評価する為に、観測データの中から、 γ 線放出を伴う α 崩壊 (^{219}Rn 崩壊) 事象 ($Q_{\alpha}=6.8$ MeV) を選択し、観測データ波形と人工波形で PSD 性能を比較した。最後に、本研究の目的である $^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$ 崩壊事象の人工波形を作成した。

本発表では、人工波形の作成方法、並びに人工波形を使用したことでの除去効率の変化について報告する。

CANDLES 実験での ^{212}Bi 起源バックグラウンドの低減

阪井 俊樹 川畑研究室 (物理学専攻)

CANDLES 実験では、 ^{48}Ca の二重ベータ ($\beta\beta$) 崩壊の研究を行なっている。また、 $\beta\beta$ 崩壊の半減期は高精度な測定が求められており、バックグラウンド (BG) 除去が課題となっている。 $2\nu\beta\beta$ 信号は Q 値 (4.3MeV) にかけて連続分布で、2.6MeV 以下では γ 線 BG が多く、2.6~4.3MeV で $2\nu\beta\beta$ 事象を数えて半減期を正確に測定したい。このエネルギー領域では、結晶内に含まれる放射性不純物の ^{232}Th 崩壊系列の娘核 (^{212}Bi , ^{212}Po) の連続崩壊 ($^{212}\text{Bi-Po}$ 事象) (2.9~5.1MeV) が主要な BG の一つとなる。半減期が 299ns の ^{212}Po の α 崩壊は、一定確率で ^{212}Bi の β 崩壊から数 ns 以下の時間差で崩壊する。この連続崩壊による二つの波形 (Double Pulse : DP) の時間差が狭まり、研究対象の $\beta\beta$ 崩壊の波形 (Single Pulse : SP) と DP の識別が困難になる。本研究では、 $^{212}\text{Bi-Po}$ 事象の波形と時間差に着目して、BG の低減に取り組んだ。CaF₂ 結晶内での β 線のエネルギー損失による事象と α 線による事象それぞれの波形を決められた時間差で重ねて作成した擬似的な SP、DP を機械に学習させることで実データに対して SP と DP の識別を試る。本発表では、本研究での識別精度と、最終的に DP と識別しきれなかったイベントが $2\nu\beta\beta$ 事象の抽出にどれだけ影響を与えるのかを評価する。

物理学専攻
素粒子・原子核グループ
会場：H701
2月9日（木）

Experimental hydrogen radicals(H^*) detection and comparison between EUV photoionized plasma and VUV photo dissociated plasma

Yubo Wang, Fujioka Laboratory (Department of Physics, IPC)

Extreme ultraviolet lithography (EUVL) light sources with a peak wavelength of 13.5 nm have been actively applied to lithography for the mass fabrication of high-performance semiconductor devices. Sn atoms and debris on the surface of the EUV mirrors reduce the reflectivity of the mirrors. Therefore, hydrogen gas is flowed to buffer the Sn ions and suppress the deposition rate of Sn. At the same time, hydrogen gas is photoionized by EUV radiation and hydrogen radicals (H^*) can clean Sn-contaminated EUV mirrors.

Detailed studies on H^* production under various conditions are required to understand and predict its long-term effects on EUV mirrors. We use the laser-induced fluorescence (LIF) technique to measure the spatial distribution and time evolution of the ground-state hydrogen radical density in hydrogen gas irradiated by EUV light from Xe plasma. In the experiment, H^* is excited by two photon absorption of the probe laser at 205.14 nm. Subsequently, the fluorescence at Balmer- α around 656.28 nm can be observed with a photomultiplier tube. From this fluorescence intensity, we can determine the temporal variation of the H^* density in the ground state. From the result, it is inferred that about 20% of total hydrogen becomes radicals in the ground state.

Instead of photoionization from EUV radiation, H^* can also be generated via photodissociation from vacuum ultraviolet (VUV) radiation, which is potential to be a more effective cleaning method as VUV photon energy is lower than EUV while photodissociation cross section is much higher than photoionization. A Schwarzschild objective (SO), composed of two concentric reflective mirrors, primary mirror and secondary mirror, was designed and tested mainly collect VUV light from Xe plasma emission. The large primary mirror reflects and focuses light on the secondary mirror, which can reflect the light again, and gather it at the focal point. There, this intense/bright radiation can be used for future experiment.

硬 X 線計測と発見的手法を用いた高速電子の特性の診断

前川 珠貴 藤岡研究室(物理学専攻)

高速点火レーザー核融合における加熱効率の向上に向けて、レーザー加速された高速電子のターゲット内部での特性を診断することが本研究の目的である。高速電子の特性は、高速点火方式における加熱効率や、高強度レーザーによるイオン加速の効率を決定する。本研究では、物質内を伝播する高速電子が放出する硬 X 線に着目し、硬 X 線のスペクトルから物質内部での高速電子のエネルギー分布を同定する手法を開発した。硬 X 線の計測には、金属フィルターとイメージングプレートを交互に重ねた High Energy X-ray Spectrometer (HEXS)を用いた。硬 X 線スペクトルから高速電子のエネルギー分布を導出するのは逆問題である。本研究では放射線輸送モンテカルロ計算コードと発見的手法を組み合わせることで、硬 X 線スペクトルや高速電子のエネルギー分布を再構成した。発見的手法とは、膨大な数の答えの候補を用意しコンピューターで順問題を解くことで、実験結果ともっとも良く一致する答えを探す方法である。

実験では、高強度レーザーを物質に照射することで発生する硬 X 線、 K_{α} 線 (共鳴線)、高速電子スペクトルを総合的に計測した。使用したターゲットは二種類であり、厚さ 40 μm の銅箔膜単体又は銅箔膜の裏面に厚さ 1 mm のプラスチックを接着したものである。この厚いプラスチックにはターゲットで生じた高速電子が、ターゲット周囲の電場で引き戻される、リサーキュレーションという現象を抑える役割がある。本手法を用いて解析した結果、薄膜ターゲット内で電子が複数回リサーキュレーションしながら硬 X 線を放出していることが明らかになった。また、高速点火実験でターゲットに取り付けられている大体積のブロックがリサーキュレーションの抑制に効果的である直接的な証拠を得ることができた。

格子 QCD 数値計算を用いた重クォーク QCD 臨界点の有限サイズスケーリング解析の 高精細化

芦川 涼 原子核理論研究室 (物理学専攻)

クォークやグルーオンの動力学を記述する量子色力学 (QCD) が記述する物質は、有限温度において相転移を起こすことが知られている。クォーク数密度がゼロの場合、この相転移はクロスオーバーである。しかしクォーク質量が現実よりも重い領域あるいは軽い領域では、相転移の次数が一次になることが知られている。しかし、臨界クォーク質量の定量的な値は分かっていない。また、一次相転移とクロスオーバーの境界に現れる臨界点は 3 次元イジング模型と同じ Z_2 普遍類に属すると考えられているが、これに関する数値的検証は発展途上である。

本研究では、格子 QCD 数値計算を用いて重クォーク領域の臨界点の解析を行う。先行研究では比較的格子間隔の粗い $N_t = 4$ で解析が行われたが、本研究ではより格子間隔の小さい $N_t = 6$ での解析を、大きな空間体積を確保したまま行う。また、ホッピングパラメーター展開と再重みづけ法を用いた効率的な数値解析を実現する。ポリヤコフループを秩序変数とみなしたピンダーキウムラント解析を行った場合、 Z_2 の有限サイズスケーリングの結果をわずかに再現しないことを示す。そこで、秩序変数を改良した解析を行い、スケーリングの成立を調べる。

AdS/CFT 対応を用いた遅延グリーン関数の非一意性に関する理論的解析

柳川 耀平 原子核理論研究室 (物理学専攻)

自然界に存在する 4 つの力を統一する理論の有力候補として超弦理論がある。AdS/CFT 対応はこの超弦理論に基づく予想であり、5 次元反ドジッター時空の量子重力理論とその境界上にある 4 次元時空の共形場理論が等価であると主張する。この主張によると、ブラックホール時空の解析を行うことで、双対な有限温度量子系の強結合領域を解析することが可能である。近年、この対応を用いた研究において有限温度量子系の遅延グリーン関数が持つ新たな普遍的性質が明らかとなった。この性質は Pole-Skipping 現象 (PS) と呼ばれる。PS とは、松原周波数と特定の複素数の運動量で遅延グリーン関数が一意に決まらないことを意味する。この現象の発見当初、PS が発現した周波数と複素数の運動量が量子カオスと関連することが知られていたため、量子系の持つカオス性が遅延グリーン関数の非一意性に反映されることが期待されていた。しかしその後の研究で、PS は様々な遅延グリーン関数が持つ普遍的な性質であり、さらには量子カオスとは関連がないと考えられる周波数、運動量でも起こるありふれた現象であることがわかった。いまだに量子カオスを示す正の松原周波数かつパタフライ速度に関連する運動量で発現する PS はエネルギー密度遅延グリーン関数だけであるが、その繋がりはいまだ解明されていない。そこで本修士論文では様々な重力理論で PS を解析し、PS と量子カオスとのつながりについて一定の考察を行った。

CANDLES 実験でのバックグラウンド事象低減に向けた モンテカルロシミュレーション開発

三好 剛 核物理研究センター (物理学専攻)

ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) は、ニュートリノがマヨラナ性を持つ場合にのみ起きる崩壊である。この探索実験はニュートリノの質量の起源解明につながる重要な研究課題の一つである。

CANDLES 実験では高い $Q_{\beta\beta}$ 値 (4.27MeV) を持つ ^{48}Ca の $0\nu\beta\beta$ 事象探索のために、96 個の CaF_2 結晶を用いて実験を行なっている。 $0\nu\beta\beta$ 事象探索では極めて低いバックグラウンド (BG) 環境が必要とされる。CANDLES 実験では様々な技術により低 BG 環境を実現できているが、それでも残る BG 事象の一つとして、 CaF_2 結晶内に含まれる Q_{β} 値=5MeV、半減期=3 分の ^{208}Tl 崩壊 ($^{208}\text{Tl} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$) がある。この BG 事象は、これまで ^{208}Tl 崩壊の先発事象である ^{212}Bi の γ 線放出を伴う α 崩壊 ($^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$) を、シンチレーション信号の波形解析と時間相関を用いて同定することで識別し除去していた。しかし、この方法では先発である ^{212}Bi 崩壊の BG 事象の候補に対して 18 分と長い時間の veto をかけており、感度の良い $0\nu\beta\beta$ 事象探索を行ううえで Livetime を不要に減らしてしまっている。また、落としきれない ^{208}Tl 崩壊の BG 事象も含まれている。

これらの問題を解決するため、新たに事象の位置情報を取り入れた解析手法を試みた。モンテカルロシミュレーション (MC) によって推定した $^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{208}\text{Tl} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ 連続崩壊事象の位置の差から、新たな同定条件を作成し、 ^{208}Tl 崩壊による BG 事象の除去効率の向上を目指した。本発表では、MC による実験データの再現結果と位置情報を取り入れた解析手法による ^{208}Tl 崩壊の BG 事象の除去効率について報告する。

チャームバリオン分光実験に用いるドリフトチェンバー読み出し回路 ASAGI ASD カードの性能評価

山本 勇次 野海研究室 (物理学専攻)

我々は、J-PARC ハドロン実験施設の $\pi 20$ ビームラインにて、チャーム・バリオン分光実験 (J-PARC E50 実験) を計画している。実験では、大強度 π^- ビームを液体水素標的に照射し、 $\pi^- + p \rightarrow D^{*-} + Y_c^{*+}$ 反応によってチャーム・バリオン (Y_c^{*+}) を生成する。 D^{*-} の崩壊モード $D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0 \pi^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-$ から K^+ と π^- を検出し、 D^{*-} の四元運動量を再構成することで、Missing Math 法によって Y_c^{*+} の質量スペクトルを測定する。 K^+ と π^- の飛跡を検出するためにドリフトチェンバーを用いる。ドリフトチェンバーの信号を読み出す回路として、ASD (Amplifier Shaper Discriminator) カードを使用する。ASD カードはドリフトチェンバーの電気信号を増幅し、波形を整形し、設定した閾値電圧を越えた信号に対してデジタル出力する。E50 実験では、Belle II 実験用に開発された AGASA ASIC チップを用いた新しい ASD カード、ASAGI ASD カードを開発した。ASAGI ASD カードは、使用するドリフトチェンバーの構造やガスのゲインに合わせて電気信号の増幅量や波形の整形時間といったパラメータを一定の範囲内で変更することができる特徴を持つ。

本研究では、試作の ASAGI ASD カードを製作し、性能評価としてテスト用ドリフトチェンバーに繋ぎ、 β 線源を用いた試験と SPring-8 において電子ビームを用いた試験を行った。飛跡検出において約 96% の検出効率と、 $170 \mu\text{m}$ 程度の位置分解能が得られた。これらの値は、先行研究として GNA-200 ASD カードを使用した際の値と同等であり、ASAGI ASD カードが十分な性能を持つことを確認した。

COMET Phase-I にむけたトリガーシステムの統合と深層学習によるオンライン事象選別の研究

宮滝 雅己 青木研究室 (物理学専攻)

COMET Phase-I は、素粒子標準模型では厳密に禁止されている μe 転換過程の探索を目的としている。実験では、2つの主要な検出器：Cylindrical Drift Chamber (CDC) および Cylindrical Trigger Hodoscope (CTH) を用いる。CDC は荷電粒子の運動量および通過位置を検出し、CTH は高精度で荷電粒子の通過時間情報を測定する。実験ではトリガーによりデータ取得のタイミングを決める。CDC と CTH それぞれにトリガーシステムがあり、これらのコインシデンスにより最終的なトリガーを発行する。CDC、CTH 両トリガーシステムはそれぞれ独立に性能試験が行われてきたが、まだ2つのトリガーシステムを合わせた性能評価は行われていない。本研究では、両トリガーシステムの統合を行い、その性能評価を行った。特に、レイテンシー測定、データ取得試験、コインシデンスロジックの確認を行い、COMET Phase-I の要求を満たすことを確かめた。また、トリガー性能を向上させ実験感度を上げることを目指し、トリガーシステムに深層人工ニューラルネットワークを導入することを検討した。これにより、トリガー判断に信号電子が CDC で作る特徴的な飛跡のパターン認識を取り入れることができる。トリガーシステムで使用予定の商用 FPGA に、深層人工ニューラルネットワークの一種である Multi-Layer Perceptron を実装し、分類性能、レイテンシーを調べた。これにより深層人工ニューラルネットワークをトリガーシステムに導入可能であることを確認した。

COMET Phase-I トリガー検出機用 SiPM 冷却システムの開発

若林 寛之 青木研究室 (物理学専攻)

COMET 実験は、標準理論ではほとんど起こらないとされる荷電レプトンフレーバー非保存過程の μ - e 転換過程を探索する実験である。COMET 実験は Phase-I と PhaseII の2段階で実施され、前者ではミューオンをアルミニウム標的に停止させ、Cylindrical Trigger System (CyDet) によって μ - e 転換過程による 105 MeV の信号電子を探索する。CyDet のトリガー生成を担う Cylindrical Trigger Hodoscope (CTH) はシンチレーターを使用し、シンチレーション光は SiPM を用いて電気信号に変換する。しかし、CTH の放射線環境では SiPM が放射線損傷し、ノイズが増加し信号事象以外でのトリガーが増加してしまう。先行研究ではこの解決策として SiPM の冷却の可能性が示された。本研究では SiPM 冷却システムの実現性を検討し、具体的な設計を進めた。同時に CTH で SiPM を使用できる放射線量と温度について調査するため SiPM の中性子照射試験を行った。取得した波形について、信号の光量・放射線量・冷却温度ごとにノイズレートの評価を行った。これより CTH の予想光量と近い 30 p.e. の信号は、 -36 °C まで SiPM 基板を冷却することで 1×10^{10} n_{eq}/cm² まで使用可能であると確認できた。

Variant axion モデルによる axion 生成

池上 魁 西岡研究室 (物理学専攻)

中性子の電気双極子モーメントの実験から QCD の CP の破れを表す θ パラメータは非常に小さい ($\theta \lesssim 10^{-10}$) ことがわかっている。これが強い CP 問題 (Strong CP problem) である。この問題を解決する方法の 1 つは Peccei-Quinn (PQ) 機構である。PQ 機構によると、標準模型に新しくカイラル対称性 $U(1)_{PQ}$ を加え、それが自発的に破れると (Pseudo) Nambu-Goldstone boson として axion が現れる。Invisible axion モデルでは $U(1)_{PQ}$ が破れるスケールが大きい ($f_a \gtrsim 10^8$ GeV) ので、予言される axion の質量は小さく ($m_a \lesssim 10$ meV) なる。そのためニュートリノのように宇宙背景放射として存在する可能性がある。CMB-S4 では CMB の観測精度の大幅な向上が期待され、このような宇宙背景に潜む axion を検出できる可能性がある。本修士論文では Invisible axion モデルの 1 つである variant axion モデルを主な調査対象とする。DFSZ モデルのように全ての世代に等しく PQ チャージを与えると散乱によってのみ axion が生成されるが、variant axion モデルではフレーバーを破るような相互作用 ($\partial_\mu a / f_a \bar{\psi} \psi'$, $\partial_\mu a / f_a \bar{\psi} \gamma_5 \psi'$) が存在するため、クォークの崩壊によって axion が作られる。電弱相転移前後であらゆる生成過程を吟味して、宇宙初期に生成される axion の量を計算する。そして、CMB-S4 によって探索されるであろうパラメータ空間を調べる。

ブラックホールと Hawking 輻射

坂川 裕則 素粒子論研究室 (物理学専攻)

ブラックホールは、その強大な重力により光さえ捕えてしまう天体であるが、実はそのブラックホールがエネルギーを放射していることがわかっている。この現象を Hawking 輻射という。本論文はその発生原理について 2 通りの方法で考察するものである。1 つ目はこの現象を初めて予測した S. W. Hawking の生成消滅演算子の変換を利用する方法によって、もう 1 つはエネルギー運動量テンソルを直接計算する方法によってである。ただここで、後者の方法を正攻法で計算しようとするると曲がった時空の場の理論が必要になり議論が複雑になる。したがって今回は Weyl アノマリーを用いて量子効果を取り入れ、後はエネルギー運動量テンソルの保存則で計算する。そして結論として両方の結果を比較し、Hawking 輻射の全体像について考える。

共形対称性に基づく, Feynman 図に依らない defect CFT データの解析

嶋守 聡一郎 素粒子理論研究室 (物理学専攻)

共形場理論 (CFT) はくりこみ固定点上の理論を記述する普遍的な理論として成功を収めてきた。例えば, 3次元 Ising 模型の厳密解は知られていないにも関わらず, 共形ブートストラップと呼ばれる手法を用いることによって臨界指数が決定できてしまうのである。しかし, 現実世界では境界や不純物などの defect と呼ばれる物体が存在するのが常であり, それらの存在を無視することはできない。そこで defect がある物理系で臨界現象を記述する枠組みが defect CFT である。defect CFT では, bulk だけでなく defect 上にダイナミカルな自由度が存在するため, defect 上に局在している演算子 (defect 局所演算子) も量子補正などを通じて異常次元を持つ。この異常次元は defect CFT データと呼ばれる理論のダイナミクスを特徴付ける重要なパラメータの一つである。

本研究では特に線状の defect に磁場が局在化している defect CFT 模型を考え, defect CFT データの解析を行う。通常, 異常次元は Feynman 図を用いて計算されるが, Rychkov と Tan により通常の CFT の場合に Feynman 図を用いずに公理的に異常次元を決定する方法が開発された。我々は彼らの方法を線状の defect が存在する defect CFT に応用することで, 臨界現象を示す時に defect に局在化した磁場が取るべき値および様々な表現の defect 局所演算子の異常次元などが公理的に導出できることが分かった。

物理学専攻
物性グループ
会場：D403
2月8日(水)

フェムト秒レーザーを用いた走査型イメージング質量分析装置の開発

井川 翔太 豊田研究室(物理学専攻)

フェムト秒レーザーとはパルス幅がおよそ数百フェムト秒の超短パルスレーザーである。レーザー加工の分野において、フェムト秒レーザーは非熱的な微細加工が可能なツールとして用いられている。パルス幅が電子-格子エネルギー輸送時間よりも大幅に短く、格子系が熱平衡状態に達する前にパルスが終了する。これによりナノ秒パルスレーザーに比べて熱拡散が抑えられるため、レーザー集光径よりも小さいスケールでの加工が可能となる。一方で、レーザーを用いた走査型イメージング質量分析には通常ナノ秒パルスレーザーが使用されている。その空間分解能はレーザー集光径によって制限され、 $\sim 10 \mu\text{m}$ である。そこで、フェムト秒レーザーを走査型イメージング質量分析装置に導入することで、より非破壊的な分析が可能となるとともに、空間分解能の向上が期待される。

本研究では、自作した飛行時間型質量分析装置にフェムト秒レーザーを導入することにより、フェムト秒レーザーを用いた走査型イメージング質量分析装置の開発を行った。高速イオンカウンティング法の実装に成功し、試料のイメージング化を試みた。

Development of Femtosecond Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer based on Ion Trajectory Simulation

Wang JianZhong Toyoda laboratory (Department of physics)

To expect to achieve mass spectrometry with highly efficient, non-thermal, and non-destructive ion desorption/ionization. We are developing a time-of-flight (TOF) mass spectrometer using the ultrashort laser pulse as a desorption/ionization source. For the testing samples, we employed alkali halide polycrystals. We analyzed the initial velocity distribution of emitted ions based on trajectory simulation in the electric acceleration field which is calculated by the surface charge method. Based on a modified Maxwell-Boltzmann energy distribution model, we evaluated emitted ions' initial velocity distribution from analysis of ion TOF spectra. For the comparative study of fs and ns laser, we employed a 160 femtosecond Ti: sapphire laser pulse with 800 nm wavelength and a 1.0 nanosecond Nd: YAG third harmonic laser pulse, and CsI as the sample. Faster velocity and higher temperature Cs^+ emission induced by nanosecond laser compared to femtosecond laser was observed at the same energy $2.5 \mu\text{J}$ per pulse.

擬一次元系における電子正孔プラズマ中の励起子分子の安定性

中田 悠介 浅野研究室 (物理学専攻)

低次元の電子正孔系では、閉じ込めの効果によって励起子の形成が促進され、束縛エネルギーの大きな励起子が安定に存在することが知られている。そこから、励起子2つが束縛状態を形成した励起子分子も低次元系では安定して存在することが予想され、一次元系においては実験的にもその存在が示唆されている。本研究では擬一次元系、有限温度の直接型半導体における電子正孔プラズマ中に埋め込まれた2組の電子正孔対に対して、有効質量近似、キャリアによる相互作用ポテンシャルの遮蔽効果、バンドギャップのくりこみ、フェルミ統計性によるパウリプロッキングの効果を考え、乱雑位相近似 (RPA) を用いてエネルギー準位を計算した。

具体的には、電子正孔プラズマ中の2つのキャリアについての有効ハミルトニアンを導出し、励起子分子を構成する粒子の二体間相互作用を記述する。その後、励起子分子中の全ての二体間相互作用を組み合わせながら双 Lanczos 法を実行することで、励起子分子のエネルギー準位を求めた。

計算の結果、励起子分子は、化学ポテンシャルと繰り込まれたバンド端のエネルギー準位が一致するプラズマ密度 (プラズマ利得開始密度) に達するまでは束縛状態を作り、それよりも高密度では束縛状態を作らなくなることが分かった。これは励起子についても同様である。また、励起子分子のエネルギー準位は励起子の準位と共に、プラズマ密度の増加によって下がっていく結果となった。さらに、電子と正孔の質量の差が大きいほど励起子分子と励起子の束縛エネルギーの比も大きくなることが確認できた。

Theoretical And Numerical Study On The Formation Of Collisionless Electrostatic Shocks

Minh-Nhat Ly Theory of High Energy Density Science Group (Department of Physics)

The study of collisionless electrostatic shocks (CES) is of great importance in both laboratory and astrophysical plasmas. CES is a widely used mechanism for generating highly mono-energetic ion beams in laser-driven plasma experiments for medical applications. In astrophysics, most shocks observed in nature are collisionless, such as the Earth's bow shock or shocks in supernova remnants. This thesis investigates the formation of CES under density and temperature gradients through particle-in-cell numerical simulations. We discovered a structural transition away from CES and discrepancies between our numerical results and current shock models. With this new understanding, we aim to propose a revised model that takes into account previously overlooked effects, such as density expansion, to better explain the observed phenomena.

ペロブスカイト型 Mn 酸化物におけるスピンの流特性の検出 廣瀬 有経 松野研究室 (物理学専攻)

強磁性層と強いスピン-軌道相互作用を持つ非磁性層との界面で出現する電流-スピン流変換がスピントロニクス研究において注目されている。これまでは金属のみで構成される二層膜が電流-スピン流変換の中心となってきたが、格子不整合から生じる不明瞭な界面がスピン変換効率の低下を引き起こす可能性がある。そのため、結晶性を制御した高品質な酸化物界面の実現により、電流-スピン流変換の向上が見込まれる。本研究では、強磁性酸化物の代表であるペロブスカイト型 Mn 酸化物におけるスピンの流特性の検出を目標とした。検出手法として、磁化とスピンの流の相互作用により磁気抵抗が変化する現象であるスピンホール磁気抵抗効果測定を用いた。

始めに、強磁性層として室温より高いキュリー温度を示す $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_3$ (LBMO) と $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ (LSMO) 薄膜[1,2]をパルスレーザー堆積法により作製した。X 線回折による構造評価と磁気特性評価から成膜条件を最適化することで、エピタキシャル LBMO (001) と LSMO (001) 薄膜が得られた。次に、より高いキュリー温度を示す LSMO 薄膜を選択し、その上に非磁性層として高い電流-スピン流変換効率を持つ $5d$ 遷移金属 Pt をスパッタ法により作製した。二層膜の作製後、LSMO 単層膜と併せてホールバー型デバイスへと加工し、スピンホール磁気抵抗及びその高調波抵抗測定を行った。基本波では単層膜と二層膜で明瞭な共通のシグナルが観測され、LSMO のバルク磁性の寄与が支配的であった。一方で、高調波では二層膜のみで明瞭な信号が得られ、このことは界面近傍の電流-スピン流変換の観測を示唆している。これにより、エピタキシャル Mn 酸化物が、界面を介したスピンの流特性を検出するための有望な強磁性物質であることが明らかとなった。

[1] J. Zhang *et al.*, Phys. Rev. B. **64** 184404 (2001). [2] F. Yang *et al.*, Appl. Phys. Lett. **97**, 092503 (2010)

$5d$ 電子系 IrO_2 の結晶性がスピンの流生成に与える影響 森本 鉄郎 松野研究室 (物理学専攻)

スピンの流の生成は、スピントロニクス分野における磁化制御技術の根幹であるため、電流からスピンの流への変換を可能にするスピンホール効果がスピンの流の生成機構として注目されている。 $5d$ 電子系 Ir 酸化物は強いスピン-軌道相互作用を担う $5d$ 電子のみが伝導に寄与する特異な電子構造を持つため、実績のある $5d$ 遷移金属 Pt や Ta を凌駕するスピンの流生成が見込まれる。最近では、エピタキシャル SrIrO_3 [1]や非晶質 IrO_2 [2]の高効率スピンの流生成が実現される一方で、結晶性がスピンの流生成に与える影響は未だ解明されていない。本研究では Ir 酸化物の結晶性に注目し、非晶質状態、多結晶状態とエピタキシャル結晶状態の IrO_2 におけるスピンの流物性の調査を行った。

始めに、マグネトロンスパッタ法と基板温度の制御によって Si 基板上に非晶質、多結晶 IrO_2 と $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 基板上にエピタキシャル $\text{IrO}_2(100)$ を各々成膜し、その結晶構造を X 線回折から評価した。次に、非磁性体 IrO_2 と金属強磁性体 $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$ 合金との界面を有する二層膜 $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}/\text{IrO}_2$ を作製し、フォトリソグラフィと Ar イオンミリングを用いてホールバー型デバイスへと加工した。スピンの流は磁性層の磁化に対して有効磁場として作用し、ホール電圧の二次高調波から検出される。この有効磁場からスピンの流生成効率を評価した。その結果、生成効率は非晶質状態で 8.4%、多結晶状態で 5.3%、そしてエピタキシャル結晶状態で 1.3% と順に減少し、電気抵抗率と逆の傾向を示した。生成効率から導出したスピンホール伝導率は電気伝導率に対して概ね一定であり、スピン-軌道相互作用に基づくスケールリング則による内因性領域の振る舞いと矛盾しない。以上の結果はスピンの流が結晶性に強く依存することを示唆しており、酸化物における多彩な結晶性の制御によって明らかになった成果である。

[1] S. Hori *et al.*, Appl. Phys. Lett. **121**, 022402 (2022). [2] K. Ueda *et al.*, Phys. Rev. B **102**, 134432 (2020).

グラフェンスピントランスポーターを用いた超伝導 Nb の逆スピントラック効果の観測

大星 和毅 新見研究室 (物理学専攻)

グラフェン(Gr)や遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)などの層状物質は、機械的剥離法を用いることで、バルクの良質な結晶性を保ったまま、理想的な2次元系を比較的簡便に実現することができる。さらに、それらの原子層物質どうしを組み合わせることで、近年様々な物理現象が明らかにされている。例えば、GrとTMDCを接合させた系におけるスピントランスポーター測定が挙げられる[1]。Grはスピントラック相互作用が小さいため、スピントラックチャンネルとして用いることで、より長距離のスピントラックが可能になる。一方、スピントラック相互作用の強いTMDCでは、超伝導や空間反転対称性の破れなどを示す物質も多く、これまでに報告されていないスピントラック特性の観測が期待できる。近年、GrとTMDCの一種であるNbSe₂超伝導薄膜を接合させた系において、常伝導状態でNbSe₂の逆スピントラック効果が観測された[2]。しかしながら、Grと超伝導薄膜は界面が十分清浄ではないため、超伝導状態特有のスピントラック測定は実現していない。そこで本研究では、Gr/超伝導ヘテロ接合におけるスピントラック測定の実現に向け、その第一手として単純な超伝導 Nb を Gr スピントラック素子に組み込み、超伝導 Nb の逆スピントラック効果の観測を目指した。まず Gr のみでスピントラック素子を作製し、Hanle 効果測定から Gr のスピントラック長を導出した。さらに、Gr/Nb 界面の清浄性を確認するために、準粒子励起による電荷不均衡状態を系統的に調べた。

[1] J. F. Sierra *et al.*, Nat. Nanotechnol. **16**, 856 (2021).

[2] A. M. Hoque *et al.*, Appl. Phys. Lett. **121**, 242404 (2022).

鉄カルコゲナイド超伝導薄膜素子における輸送測定

中村 瞭弥 新見研究室 (物理学専攻)

鉄系超伝導体は、銅酸化物超伝導体に次ぐ高い超伝導転移温度を持つ物質群として、精力的に研究が行われている。鉄系超伝導体は非常に大きな上部臨界磁場を持つ上に、銅酸化物超伝導体に比べて異方性が小さいという性質を持つため、超伝導線材への応用展開が目指されている。また、鉄系超伝導体の中でも、鉄カルコゲナイド超伝導体は FeCh (Ch=S, Se, Te) 層のみで構成された最も単純な結晶構造を持ち、磁気転移を伴わない電子ネマティック相や非自明なトポロジカル相など豊富な物性を示すため、基礎物理の観点においても注目されている[1]。

そこで本研究では、鉄カルコゲナイド超伝導体を原子層薄膜素子に加工し、ネマティック相やトポロジカル相といった物性にアプローチすることを目指した。まず、原子層薄膜として報告の少ない FeSe_{1-x}Te_x に対して輸送測定を行い、基礎物性を調べた。さらに、異なる膜厚の FeSe_{1-x}Te_x 素子を用いて磁束ピン留め機構を詳細に調べた結果、FeSe_{1-x}Te_x の持つ不均一性と強く相関していることを発見した[2]。また、トポロジカル超伝導体同士の Josephson 接合素子では 4π 周期の超伝導電流が現れるため、FeSe_{1-x}Te_x 薄膜を重ね合わせることで、Josephson 接合素子の作製を試みた。本発表では、FeSe_{1-x}Te_x における磁束ピン留め機構の詳細と、Josephson 接合素子の作製について報告する。

[1] T. Shibauchi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 102002 (2020).

[2] R. Nakamura *et al.*, Phys. Rev. B **104**, 165412 (2021).

ファンデルワールス磁性体($\text{Fe}_{5-x}\text{Co}_x$) GeTe_2 の磁気抵抗効果

黒川 開斗 新見研究室 (物理学専攻)

FeGeTe は最もよく知られた層状強磁性体の 1 つであり、他の層状強磁性体 (例えば CrI_3 : $T_C \sim 61$ K, CrGeTe_3 : $T_C \sim 66$ K) に比べて高いキュリー温度 ($T_C > 200$ K) を持つ。 FeGeTe 系の中でも、 Fe_5GeTe_2 は室温以上の T_C (~ 310 K) を示す[1]。また一部の Fe を Co や Ni で置換することで、 T_C の増大や磁気異方性の変調、磁性自体を強磁性から反強磁性に出来ることも報告されている[2]。また Fe_5GeTe_2 を、機械的剥離法を用いて原子数層レベルまで薄くした「ファンデルワールス素子」では、薄膜化によって磁気特性に変化が表れることが知られているが[3,4]、一部の Fe を Co 置換した物質ではその詳細な報告はなされていない。

本研究では、Co 置換率が異なる様々な $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_5\text{GeTe}_2$ バルク試料 ($x = 0, 0.05, 0.19, 0.46$) を用いて薄膜素子を作製し、Co 置換率の違いによる磁気特性の変化を系統的に評価した。ホール測定の結果から、バルク試料で報告されている Co 置換率による磁性の変化が、薄膜素子でも強固に維持されることを確認した[5]。また $x = 0.46$ の反強磁性相では、 ± 2.5 T 付近のスピンフロップ転移磁場に、バルクでは見られない顕著なヒステリシス (ΔB) を観測した。この ΔB は 30 K 以下の低温部で顕著に増大することが分かった。本発表では、 Fe_5GeTe_2 の Co 置換による磁性の変化と、反強磁性相 $x = 0.46$ において観測されたスピンフロップ転移及び転移磁場における磁気ヒステリシスの詳細について報告する。

- [1] J. Stahl *et al.*, *Allg. Chem.* **644**, 1923 (2019). [2] C. Tian *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **116**, 202402 (2020).
[3] T. Ohta *et al.*, *Appl. Phys. Express* **13**, 043005 (2020). [4] T. Ohta *et al.*, *AIP Adv.* **11**, 025014 (2021).
[5] T. Ohta, K. Kurokawa *et al.*, submitted.

Simulations of teacher-student scenario in deep neural networks

SEOKTAM JEON

KIKUCHI laboratory(Department of Physics)

Recently deep neural networks (shortened as DNN) are widely used in various fields including auto-driving without a trained driver. But the mechanism behind their efficiency remains largely unknown. In this situation, approaches based on statistical mechanics may provide useful insights. The teacher-student scenario is a good framework to analyze machine learning of DNN based on statistical mechanics. In the present work, we executed simulations of the teacher-student scenario on a class of simple DNNs.

In the teacher-student scenario, the student machines try to infer the configuration of the synaptic weights of the teacher machine, knowing only the input and output of the teacher machine. We simulate learning by the student machines which try to minimize the loss function (or cost function) which measures the difference between the teacher's output and the student's output. The results of our simulations clarify the following questions : 1. By different learning algorithms, the machines travel the same configuration space? 2. the "equilibrium states" accessible regardless of the initial states and algorithms?

For the architecture of the DNNs, we consider a simple multi-layer network, made up of many perceptrons, depth L , and width N . For the activation function, we consider ReLU, tanh, sgn functions. And as optimizing algorithms, we utilized Monte Carlo simulation ($T = 0$, greedy) and (Stochastic) Gradient descent.

短周期超格子ドーブ GaAs/AlGaAs 量子井戸構造を用いたゲート制御量子素子の作製と光照射効果の評価

神田 哲汰 大岩研究室(物理学専攻)

ゲート制御量子ドット内の電子スピンは高い集積度などの特徴から量子コンピュータの有力な候補であるだけでなく、半導体の光学特性から長距離量子情報通信における量子中継器の基盤技術への応用も期待できる。これらの量子中継器の基礎研究に向けて解決すべき課題の一つが、GaAs/AlGaAs ヘテロ構造における AlGaAs 層の Si ドーパントが形成する深い不純物準位(DX センター)による永続的光伝導 [1]によって起こると考えられる、量子ドットの精緻なゲート電圧条件の変化である。

本研究では、DX センターの形成を抑制すると期待される短周期 GaAs/AlAs 超格子ドーブ GaAs/AlGaAs 量子井戸構造[2]を用いてゲート制御低次元量子素子の作製を行なった。また量子ドットを構成する量子ポイントコンタクトのピンチオフ電圧と 2 次元電子キャリア濃度の光照射依存性を比較し、短周期超格子ドーブ量子井戸での光照射効果とそのゲート制御量子素子への影響を議論する。

[1] A.Kastalsky et al. Solid State Communications 51, 5, 317-322, (1984).

[2] V.Umansky, M.Heiblum et al. Journal of Crystal Growth 311 (2009) 1658-1661.

Pt ニクタイトにおける多形制御と超伝導に対する化学置換効果

岸大路 泰宏 工藤研究室 (物理学専攻)

六方晶 $AEPtPn$ (AE : アルカリ土類金属、 Pn : ニクトゲン)は、Pt と Pn からなるハニカムネットワークの超伝導を研究するための豊かな舞台を提供してくれる[1-3]。例えば、 $SrPtAs$ [1]、 $BaPtSb$ [2]では、それぞれ、カイラル d 波超伝導[4]、カイラル p 波超伝導[5]の発現が理論的に提案されている。さらに、六方晶 $BaPt(As_{1-x}Sb_x)$ では、超伝導転移温度 T_c の x 依存性が $x \sim 0.1$ 付近でピークを示すことと、その振る舞いを電子格子相互作用では単純には説明できないことが報告されている[3]。 $BaPt(As_{1-x}Sb_x)$ は、 $x \sim 0.02$ 付近にもう一つ T_c のピークを示すが、 $x < 0.05$ で立方晶 $BaPt(As_{1-x}Sb_x)$ が同時に生成するためどちらの相による T_c のピークか不明であった[3]。本研究では、 $x < 0.05$ において立方晶 $BaPt(As_{1-x}Sb_x)$ の良質試料の合成に成功し、それが超伝導を示さないことを明らかにした。六方晶 $BaPt(As_{1-x}Sb_x)$ が T_c のダブルドーム構造を示すことがわかった。このことは超伝導状態が x に依存して変化することを示唆しているのかもしれない。さらに、本研究では、 $SrPt(As_{1-x}Sb_x)$ において、超伝導が格子定数の比 c/a に依存して急激に抑制されることを見出した。

[1] Y. Nishikubo, K. Kudo, and M. Nohara, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 055002 (2011).

[2] K. Kudo, Y. Saito, T. Takeuchi, S. Ayukawa, T. Kawamata, S. Nakamura, Y. Koike, and M. Nohara, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 063702 (2018).

[3] T. Ogawa, K. Manabe, T. Takeuchi, T. Kida, H. Kuroe, M. Hagiwara, J. Goryo, T. Adachi, and K. Kudo, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 123702 (2022).

[4] M. H. Fischer *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 020509(R) (2014).

[5] M. Kudo *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **2164**, 012015 (2022).

インターグロース構造を利用した層状ペロブスカイト型 V 酸化物の物性開拓

藤井 隆弘 工藤研究室 (物理学専攻)

典型的な強相関電子系である層状遷移金属酸化物は、電荷・スピン・軌道の自由度が絡み合った新奇な物性を示す。遷移金属酸化物層とそれとは異なる構造の層が交互に積層したインターグロース構造をとる物質は、新奇物性開拓に適した舞台である。Sr₂VMA₃O₃ (M: 遷移金属) は、層状ペロブスカイト型の V 酸化物層と、逆蛍石型の MA₃ 層によるインターグロース構造を持つ。3 価の V を含み、軌道自由度が存在しているため、多自由度に関連する新奇物性の発現が期待される。特に M = Ni の場合、逆蛍石型 NiAs 層を持つ物質は Ni の磁気秩序を示さないため、V 由来の物性を調べることができると考えられる。そこで、私たちは Sr₂VNiAsO₃ に着目した。合成の報告はあるが、得られた多結晶試料に不純物が多く含まれており、物性は明らかになっていない[1]。

本研究では、Sr₂VNiAsO₃ の純良多結晶試料を合成し、その試料を用いた物性測定を行った。仕込み組成の酸素量を減らして合成することで、不純物を大幅に抑えることに成功した。磁化の温度依存性が、160 K で折れ曲がり、60 K 以下で増大を示した。160 K では、比熱の温度依存性がピークを示した。V が 3 価の層状ペロブスカイト型 V 酸化物において、明確な相転移を見出したのは初めてである。磁化曲線の測定から、60 K 以下の磁化の増大は、自発磁化の発達に対応していることが示唆された。この温度では、比熱に異常が観測されなかったため、短距離磁気秩序が形成されていると考えられる。

[1] Y. Matsumura *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **234**, 012025 (2010).

PtBi₂ における Se/Te 部分置換による 極性非極性構造相転移と超伝導転移温度上昇の発見

高木 健輔 工藤研究室 (物理学専攻)

MX₂ 化合物は、M の *d* と X の *p* のエネルギーとフィリングに依存して様々な結晶構造をとる[1]。このことは、電子数の調整により結晶構造の制御が可能であることを示唆している。その中でも、同一の化学組成で様々な結晶構造を示す PtBi₂ は興味深く、上記の特徴に加えて構造不安定性を有する[2,3]。

本研究[2,3]では、 γ' 型 PtBi₂ (P31m, C_{3v}², No. 157) に着目した。この化合物は、極性構造とスピン軌道相互作用に起因するフェルミ面のスピン分裂[4]、転移温度 $T_c = 0.6$ K の超伝導を示す[5]。本研究において、Bi サイトへの Se/Te 部分置換 [Pt(Bi_{1-x}Ch_x)₂ (Ch = Se, Te)] により電子をドープすることで、極性非極性構造相転移とそれに伴う T_c の著しい上昇を発見した。リートベルト解析の結果、Se/Te 部分置換によって Bi サイトのシフトが消失し非極性構造 (P $\bar{3}m1$, D_{3d}³, No. 164) が安定化することが明らかとなった。磁化、電気抵抗率、比熱の温度依存性を測定した結果、この構造相転移に伴い T_c が 0.6 K から 2.4 K に上昇することがわかった。非極性相において、系が相境界に近づくにつれて T_c が上昇した。Pt(Bi_{1-x}Ch_x)₂ (Ch = Se, Te) では、極性非極性構造相転移の近傍で超伝導が増強されている。この化合物は極性構造の揺らぎと超伝導の関係を調べるための有用な系になるかもしれない。

[1] S. Jobic *et al.*, J. Alloys Compd. **178**, 253 (1992).

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

[3] K. Kudo, **K. Takaki** *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 063706 (2021).

[4] Y. Feng *et al.*, Nat. Commun. **10**, 4765 (2019).

[5] G. Shipunov *et al.*, Phys. Rev. Mater. **4**, 124202 (2020).

正方晶 EuAu_2Ge_2 の回転対称性の破れた磁性相における 異常ホール効果の巨大変化

湯浅 直輝 花咲研究室 (物理学専攻)

物質中にスピンの同一平面上に乗らない構造が存在する場合、伝導電子が局在スピンとの交換相互作用を介して有効磁場を感じ、ホール抵抗に変調を与え得る。磁気スキルミオン状態でのトポロジカルホール効果(THE)はこの好例であり、従来は磁気フラストレートのある系や反転対称性の破れた系で報告された[1,2]。さらに近年、特殊な構造を持たない磁性体においても、RKKY相互作用の高次効果によりスキルミオンが安定化することがわかり[3]、幅広い磁性体でTHEの発現が期待される。

そこで本研究では単純な構造を有する磁性体に発現する、複雑な磁気構造や伝導現象の起源解明を目的とした。我々は合成報告が多結晶に限られていた正方晶 EuAu_2Ge_2 (図1)の単結晶合成に初めて成功した。磁気抵抗・磁化測定を行うことにより、本物質は2つの異なる反強磁性秩序状態を有し、高磁場相で磁化に比例しない異常ホール効果が顕著に発現することを見出した。しかし従来のスキルミオン系と比較したところ、磁化曲線やホール抵抗率の定性的な振る舞いが大きく異なることが分かった。また、中性子散乱実験から本物質は比較的大きな磁気変調ベクトルを有するという相違点も明らかとなった。さらに回転磁場中の抵抗測定の結果、高磁場相では結晶の4回回転対称性が破れていることが示唆された。発表ではこれらの観測結果をもとに、本物質で実現している磁気秩序と輸送現象の関係について議論する。

[1] A. Neubauer *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 186602 (2009).

[2] T. Kurumaji *et al.*, *Science* **365**, 914 (2019).

[3] Khanh, N.D. *et al.*, *Nat. Nanotechnol.* **15**, 444 (2020).

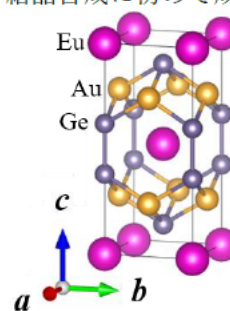


図1 EuAu_2Ge_2 の結晶構造

物理学専攻
物性グループ
会場：D403
2月9日(木)

ツイストグラファイトにおける垂直電気伝導の理論

谷 天太 越野研究室 (物理学専攻)

近年、二次元物質を結晶方位を揃えずに積層した「ツイスト積層系」が盛んに研究されている。例えば二枚のグラフェンを回転して重ねたツイスト二層グラフェンでは、回転角度が魔法角と呼ばれる特別な値を取るときに超伝導が発現することが知られている。我々の疑問は「三次元物質をツイスト積層すると、なにがおこるか」という問題である。この三次元ツイスト系では、例えば回転角の調節で垂直方向の電気伝導の特性を変化させられる可能性がある。一方で、三次元ツイスト系の電気伝導に関する基礎理論は確立されておらず、ツイストが伝導に与える効果は明らかでない。そこで我々は、グリーン関数を用いた垂直電気伝導の計算手法を開発し、最も基本的な三次元ツイスト系であるツイストグラファイトに適用した。垂直伝導率は、フェルミ面の重なりから予想される結果とは異なり、回転角に対して非単調な角度依存性を示す。波数ごとの伝導度を調べることにより、この依存性はフェルミ面の重なり中心における行列要素の極端な減少に起因することを明らかにした。また再帰的グリーン関数法を用いた計算により、ツイスト界面における局在状態の存在を示した。透過係数の減少はこの界面状態によるファノ共鳴に起因することを明らかにした。将来的には、これらの手法は超伝導層状物質のツイスト積層系に拡張することが期待される。[1] N. Yabuki *et al.*, *Nat. Commun.* 7, 10616 (2016).

空間変化する電場が誘起するマグノン流の理論

山本 和輝 越野研究室 (物理学専攻)

スピン流には典型的に伝導電子スピン流とスピン波スピン流 (マグノン) の2種類が存在する。前者は1990年頃から精力的に研究されてきたが数百ナノメートル程度の短い距離で消失してしまうという欠点があった。近年、実験技術の発展によりマグノンのダイナミクスを制御、測定することが可能となったことでスピン波スピン流が物質によっては数センチメートルもの距離を伝播することが明らかにされ[1]、マグノンをキャリアとするスピントロニクスが注目を浴びている。

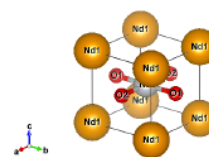
本研究ではアハラノフ・キャッシャー効果を使ってマグノン流を制御することを考える。半古典的な議論から空間的な勾配のある電場中のマグノンにローレンツ力と類似した力が働くことが知られているが[2]、純粋に量子力学的な手法による解析は未だおこなわれていない。そこで今回、3次元強磁性体において空間的に変化する電場をかけた時に生じるマグノン流をグリーン関数の手法を用いて量子力学的に計算した。その結果マグノン流と電場の間にアンペール則と類似の関係が成り立つことがわかった。さらにマグノン流の化学ポテンシャル依存性を調べ、ボーズ・アインシュタイン凝縮の生じる転移点での発散を明らかにした。

[1] Y.Kajiwara, *et.al.*, *Nature* 464,7286 (2010) [2] F.Meier and D.Loss, *Phys. Rev. Lett.* 90, 167204 (2003)

NdNiO₂ のスピン揺らぎ媒介超伝導における残留水素の影響に関する研究

梶谷 拓矢 黒木研究室 (物理学専攻)

無限層構造を持つ NdNiO₂ を母物質として Nd を Sr に置換してホールドープした物質が超伝導性を示すことが近年実験的に発見された。[1] これまでこの物質が超伝導を示すのは、Ni の 3d 軌道のほとんどに電子が埋まり、孤立したエネルギーの最も高い軌道だけ電子が半分埋まった状態 (half-filled) になることで典型的な d 波型の高温超伝導体である銅酸化物超伝導体と似た電子状態になることに起因すると考えられてきた。しかし NdNiO₂ はペロブスカイト構造を持つ NdNiO₃ の頂点酸素を CaH₂ を用いて還元して生成する [2] のであるが、この生成過程で酸素の抜けた空隙に水素が入る (残留水素) 可能性が理論的に指摘されている。[3] 実際、還元剤を用いず直接結晶成長によって NdNiO₂ を生成しても超伝導性を示さなかったという実験結果が出ている。[4]



NdNiO₂ のモデル

そこで本研究では水素の入っていない NdNiO₂ と酸素の抜けた空隙に水素が入ったことを想定したモデルを作り、第一原理計算、Wannier 関数を用いた有効モデルの構築、揺らぎ交換近似 (FLEX) などを用いて Eliashberg 方程式を解き、電子数を変化させつつ超伝導の指標となる λ を計算した。その結果、水素の入っていないモデルでは d 波と s 波がそれぞれ有利になる領域があったが、空隙に水素が入ったモデルでは s 波超伝導が常に有利になる傾向があった。

[1]D. Li et al., Phys. Rev. Lett. 125, 027001 (2020)

[2]D. Li et al., Nature 572, 624 (2019)

[3]L. Si et al., PRL 124, 166402 (2020)

[4]X.-R. Zhou et al., Rare Metals 39, 368-374 (2020)

正方格子及び三角格子上の Hubbard 模型における輸送係数の研究

堀内 健司 黒木研究室 (物理学専攻)

近年、先進国にて消費されるエネルギー7割近くの排熱は未利用のまま廃熱として捨て去られ、排熱の有効利用として排熱エネルギーを電力に変換するクリーンな発電手段として熱電変換がある。熱電変換とは熱エネルギーと電気エネルギーの相互変換の事で、金属や半導体に温度差を与える事によって温度差に比例する電圧を生み出すゼーベック効果をもとめて熱電効果と呼ぶ。ゼーベック効果によって取り出すことの出来る電力の指標として $PF = \sigma S^2$ と表現される PowerFactor (電力因子) が存在する (σ は電気伝導率、 S はゼーベック係数)。一般的にゼーベック係数と電気抵抗率の間にはトレードオフの関係があり、従来のボルツマン輸送理論では記述が困難な電子間相互作用による散乱現象の熱電効果への寄与は研究が進み、銅酸化物高温超伝導体の多くは層状物質で共通に有する正方格子 CuO₂ 層が超伝導発現機構に深く関与していると言われ、既存の熱電変換材料に匹敵すると報告がなされる層状コバルト酸化物ナトリウムは三角格子 CoO₂ 層を共通に有し電気伝導を担っていると言われる。本研究では久保・ラッティンジャーの線形応答理論に基づき、乱雑位相近似 (RPA) を用いて二次元 Hubbard 模型正方格子と三角格子に対する熱電効果の解析を行なった。

硫化サマリウムの電流誘起金属化における電子状態変化の観測

立川 慎吾 光物性研究室 (物理学専攻)

硫化サマリウム (SmS) は、常圧では黒色の半導体 (エネルギーギャップは約 0.1 eV) もしくは絶縁体であるが、圧力を 0.7 GPa 以上かけることで電気抵抗率が 1 桁以上減少し、金色の金属へ価数変化を伴う相転移 (BG 相転移) をすることが知られている。近年では電流印加による I-V 曲線の非線形な変化が報告されている。これはキャリア密度の増加および金属化を示唆しており、圧力誘起相転移と同様の相転移 (電流誘起 BG 相転移) が起きている可能性が考えられる。

そこで我々は、SmS の電流誘起 BG 相転移の観測を目的とし、THz~紫外領域における反射スペクトルの電流・温度依存性を測定した。その結果、低温・低電流領域において電流印加によるドルーデ成分の急激な増加、即ち金属化が観測された。しかし実験から見積もった金属化後のキャリア密度は圧力で生じた金属相に比べて低く、BG 相転移直前の状態に近かった。キャリア密度増加の起源としては、局在した Sm 4f 電子が印加された電子との相互作用により非局在化したことが考えられる。以上より、圧力誘起 BG 相転移とは異なる Sm 4f 電子の電流誘起局在-非局在転移の観測に成功したと考えられる。

硫化サマリウムの光誘起バンドシフトと格子定数変化

Chen Yitong 光物性研究室 (物理学専攻)

硫化サマリウム (SmS) は、圧力印加によって黒色絶縁体 (BI) から金色金属 (GM) への相転移 (BG 相転移) を示す物質である。BG 相転移の起源として、励起子の生成とその凝縮が提案されている。しかしながら、BG 相転移では励起子の生成と格子収縮が同時に発生するため、どちらが相転移の起源であるかは自明ではない。一方、我々は光照射によって励起子が大量に生成されることに着目して、光で BG 相転移を引き起こせるかどうかについて研究を進めてきた。これまでに、光照射によって赤外反射率と Sm の平均イオン価が変化し、光誘起相転移の発生を示唆する結果を得たが、BG 相転移を明確に示すフェルミ準位近傍のバンド構造の変化や格子変化に関する詳細な情報が得られておらず、光による BG 相転移が可能かどうかは明確でなかった。そこで本研究では、時間分解光電子分光 (TrPES) と時間分解 X 線回折 (TrXRD) を用いて、光誘起相転移におけるバンド構造と格子定数の過渡的変化を調査し、光による BG 転移の可能性を調査した。

TrPES の結果、光照射によってエネルギーギャップが小さくなるが、GM 相のような金属にならないことが分かった。また、TrXRD では、寿命の長い光誘起相の生成が確認され、さらに光誘起相の格子定数は BI 相とほぼ同じであり、GM 相とは異なることが分かった。以上の結果から、SmS は光誘起相転移を起こすが、生成された光誘起相は BG 相転移の GM 相と異なる準安定相であることを示している。この結果は、GM 相に至るには別の要因、例えば格子収縮が必要であることを示唆している。

GaSb における光誘起 THz 波の起源の特定

山本 智士 木村研究室 (物理学専攻)

近年報告された磁性多層膜におけるスピン流由来の THz 電場は、極めて薄い領域からの発生にも関わらず、半導体等を用いた従来の発生法に比肩する強度を示すなど、新たな THz 電場の発生源として注目されている。一方で、磁性多層膜の基板として用いられる半導体からも THz 電場が発生するために、それらを区別することは困難である。そこで、半導体由来の THz 電場を特定する方法を確立するために、半導体基板から発生する THz 電場の特性の解明を目的として、半導体基板として用いる GaSb の 2 つの異なる面である(110)面及び(111)面に対し、光誘起 THz 電場のポンプ光の偏光角度依存性を測定した。(110)面では偏光に依存する成分と依存しない成分が観測され、偏光依存成分は差周波発生、偏光依存しない成分は双極子放射による THz 電場のモデルを用いて説明できた。また、差周波発生による THz 電場は、ポンプ光の偏光に加え試料の結晶面にも依存するが、(111)面の場合も同様にして説明できることがわかった。今回の結果により、半導体による THz 電場の発生原理と性質が明確になったため、今後計画されている磁性多層膜からの THz 電場の測定において、半導体基板の効果を除去する方法が確立できた。

スピン偏極共鳴電子エネルギー損失分光装置の高効率化と

NiO の共鳴非弾性電子散乱スペクトル測定

吉田 悠人 光物性研究室 (物理学専攻)

次世代デバイスとして、強相関電子系の新たな機能性に注目が集まっており、その基礎研究が進められている。これらの性質は固体中の素励起によって決定づけられており、準粒子とプラズモンなどの集団運動、そしてそれらの相互作用を直接観測することが重要な鍵になる。我々の研究室では、スピンや元素を選択した集団運動や電子励起の観測を目指して、スピン偏極共鳴電子エネルギー損失分光装置(SP-rEELS)の開発に取り組んできた。この手法は電子源に高偏極のスピン偏極電子を取り出せる GaAs/GaAsP 歪超格子電子源を用い、入射電子線のエネルギーを 0.3~1.5keV の間で自由に選択することを可能にして、希土類化合物の 3d 内殻や、遷移金属化合物の 2p 内殻からの励起を使った共鳴による元素選択を可能にした新規の方法論である。本研究では、この方法論を実証するために、電子光学系の改良による空間分解能の向上等の改良を行い、最終的に遷移金属酸化物 NiO の d-d 励起及び O2p-Ni3d 励起の 2p-3d 共鳴増大の観測に成功した。

宇宙地球科学専攻

会場：F608

2月8日（水）

月極域探査に向けた着氷レゴリスシミュラントの近赤外スペクトル測定

加藤礼也 佐々木研究室 (宇宙地球科学専攻)

様々な観測から月には水が存在しているといわれている。月極域には永久影と呼ばれる一年を通して日当たらない領域が存在し、非常に低温であるため水分子が氷として地質学的なスケールで保存されていると考えられている。月極域に存在する水氷の具体的な量や分布を調べることを目的とした月極域探査ミッション (LUPEX) が日本とインドの共同で計画されている。LUPEXには近赤外画像分光装置 (ALIS) が搭載されており、その場で月面の反射スペクトルを観測し、得られたスペクトル形状から観測領域に存在する水の量を推定する。

本研究では、この月極域ミッションに適応可能なデータの取得を目的とする。粉体鉱物試料に微量の氷を付着させ近赤外反射スペクトルを測定する。スペクトル中に見られる水氷による波長 1500nm 付近の吸収の深さと着氷率との関係を調べた。月面で測定したスペクトルから氷の存在量を推定するために、様々な鉱物・粒径に対してのデータが必要になる。これまでに斜長石やかんらん石など一種類の鉱物を用いての実験が行われてきた。本研究では実験試料として粒径を 75-125 μm 、125-180 μm にそろえた月の海地域と高地地域のレゴリスシミュラントをもちいた。レゴリスシミュラントは斜長石、輝石、かんらん石などの透明鉱物や、イルメナイトなどの不透明鉱物から構成されている。実験の結果、粒径が大きいほうは氷による吸収深さの変化が大きく、高地シミュラントのほうが海シミュラントに比べ氷による吸収深さの変化が大きくなった。不透明鉱物の粒径の違いが高地シミュラントと海シミュラントの違いに影響を与える一つの原因だと考えられる。

氷天体の内部進化におけるアンモニアの寄与

筏明子 佐々木研究室 (宇宙地球科学専攻)

氷天体におけるアンモニアの存在は、氷の凝固点を大きく下げる物質として地下海の存否やその進化に大きな影響を及ぼす点で極めて重要であり、一部の氷天体ではその存在が分光観測で確認されている。しかし、内部構造やその進化を推定した従来の理論モデルではアンモニアの作用は凝固点降下しか考慮しておらず、アンモニアが氷天体の進化に与える影響は正しく評価されていない。

そこで本研究では、氷天体の内部進化に関する従来のモデルにおいて、新たにアンモニア濃度に伴った密度変化や、過飽和状態での地下海における固体水和物の析出を考慮し、アンモニアが内部進化に与える影響を再考察した。また、太陽系の氷天体は様々な表面半径と平均密度を持つことを考慮し、表面半径 500~1000 km および平均密度 1.0~2.5 g/cc の範囲における多様な氷天体に対して包括的なモデル計算を行った。その結果、地下海に溶存したアンモニアは海の薄化と共にその濃度が上昇し、初期アンモニア濃度が 0.5 wt% でも過飽和状態となってアンモニア二水和物が析出し海底に沈殿することで、凝固点降下だけを考慮した従来の推定よりも地下海の存続期間が短縮されることが分かった。また、アンモニアの密度変化を考慮したことによって、地下海の厚さ変化に伴う表面半径の変化量は H₂O の固液変化のみを考えた場合の変化量に比べて 10%程度減少することも分かった。これは、表面での断層形成を困難にする可能性がある。

また本研究では、氷天体におけるアンモニア (およびメタン) の存在を観測的に実証するため、従来観測実績がほとんど無い天王星衛星に対し地上望遠鏡を用いた分光観測を行った。天王星衛星が非常に暗いことや天候不順が続いたことなどから、明瞭な吸収シグナルを検出することはできなかったが、メタンの存在量に対する上限値の推定を行った。

Enceladus プルームの土星リングへの組成的影響とプルーム活動期間

山口朋恵 佐々木研究室 (宇宙地球科学専攻)

土星の衛星 Enceladus では、南極にある亀裂(Tiger stripes)から内部の海水がプルームとして噴出しており、その一部は Enceladus の重力圏を脱出して土星のメインリングに降着している可能性が指摘されている。水氷を主成分とする土星リングの推定年齢は、外来の不純物降着による暗化速度に基づいて約 1 億年とされるが、Enceladus からの水氷の降着がリングの年齢を実際より若く見せている可能性が示唆されている。この描像を検証するため、地上望遠鏡を用いた複数夜の観測によってリングの反射スペクトルを取得しその時変動を調べ、Enceladus の公転運動との依存性や Cassini 探査機による 2007 年の観測データとの比較を行った。その結果、大きな変動は認められず、リング粒子の水純度は数日から十数年の期間においてほぼ一定であることが分かった。これは Enceladus のプルーム噴出がその時間スケールでは定常的であったことを示唆する。

従って、リングの年代を正しく見積もるには、より長い時間スケールでの Enceladus プルームの変動を見出すことが重要となる。プルーム活動の開始時期は明らかになっていないが、プルーム源である地下海と噴出口となる Tiger stripes の形成が必須である。Tiger stripes 形成は氷殻(地下海)の厚さに強く依存するため、その厚さの長期変化の推定がプルーム活動期間の推測につながる。Cassini 探査から、現在の Enceladus の氷殻厚さは一部で 10 km 以下、表面熱流量は 0.1-0.7 W/m²、そして中心に含水鉱物からなる低密度核が存在することが分かっている。これらを同時に満たす進化史を内部進化のモデル計算から見出し、必要な潮汐加熱率と氷の粘性率の範囲を特定した。その結果、Enceladus の軌道を一定と仮定すると、岩石の潮汐加熱率が 5-7 GW、氷殻では 30 GW 以上、氷の粘性率は 1.0×10^{14} P・s 以上必要であることが分かった。また、推測されるプルーム活動期間は 40 億年以上となった。

月永久影の水コールドトラップ再現装置を用いた

水分子供給量調整の実験

高橋華乃子 佐々木研究室 (宇宙地球科学専攻)

近年、各国による月探査から月の水存在可能性が高まってきた。月極域には永久影と呼ばれる、太陽光が直接届くことがないため常に低温に保たれている領域が存在する。そこでは水を代表とする揮発性物質を極低温下で何億年も捉える、コールドトラップという機構が発生していると考えられている。月における水分子の供給源として水分を含んだ彗星や隕石の衝突、太陽風プロトンと月表面の岩石中の酸素との酸化還元反応を引き起こす太陽風インプレクションなどが挙げられている。

本研究では、模擬レゴリスへの着氷実験を想定し、水分子の供給源となる氷の温度を変化させることで、実験装置内の水蒸気分圧を制御することを目的としている。水分子の平均自由行程がレゴリス間隙距離よりも長い場合の、レゴリス中の水分子の挙動を確認するための準備実験である。ステンレス配管内をロータリーポンプで廃気し、さらに真空度を上げるために液体窒素を用いたコールドトラップを接続した。その状態で、水分の供給源となる氷が入った試験管を接続し、氷の温度を変化させたときの真空配管内の水蒸気分圧を比較した。結果、氷の温度によって水蒸気分圧を制御することに成功した。

地上望遠鏡を用いたエウロパ可視近赤外観測による軽金属元素と 非 H₂O 氷の探索

鶴海 達大 佐々木研究室 (宇宙地球科学専攻)

木星の衛星の一つであるエウロパでは、探査機や地上望遠鏡を用いた観測によって、軽金属元素 (Na, Mg, K, Ca) の存在が予測され、スペクトルの形状から、Na-, Mg-塩や硫酸水和物の存在が示唆されている。このような物質はスパッタリングや昇華によって大気を構成すると考えられるため、大気組成や分布を理解することは、衛星形成の材料や進化過程、衛星間の物質輸送過程の解明に極めて重要である。また、揮発性の高い非 H₂O 氷 (CH₄, NH₃) の存否確認は、衛星形成時の温度、圧力環境の解明につながると考えられる。しかし、これらのような調査は、限られた領域に対しての観測や数夜のみでの観測など未だ限定的であり、加えて地上望遠鏡を用いた観測では、地球大気補正の高精度化が必須となる。

本研究では、北海道大学附属天文台のピリカ望遠鏡を用いて、計 30 夜にわたり、エウロパの可視近赤外領域 (約 400 nm-930 nm) における撮像観測を行った。観測データの解析では、Python/Astropy を用いた開口測光、簡易分光を行った。地球大気補正は、測光標準星を利用する方法と、放射輸送計算による地球大気モデルを用いる方法の 2 通りの手法で行い、エウロパ表面における反射率スペクトルを得た。ここから輝線の有意性を評価した結果、先行半球～反木星側半球にかけての領域で、中性 Ca に起因する輝線を検出した。これは、先行半球で電離層の電子密度が低いとする先行研究の結果と整合的である。一方、非 H₂O 物質の分子に起因する明確な吸収は検出できなかったため、ノイズレベルの 3 σ 値から、柱密度での存在量の上限值を推定した。その結果、エウロパにガスとして存在する CH₄ の柱密度は、約 10³ molecules/cm² のオーダーであると見積られた。

ケイ酸塩鉱物への紫外光照射による宇宙風化模擬実験

盛満眞一 佐々木研究室 (宇宙地球科学専攻)

宇宙風化とは、月や小惑星などの大気を持たない岩石天体が、長時間宇宙空間に晒されることで、表面物質の光学特性が徐々に変化していく過程である。主な光学特性の変化としては、反射スペクトルの赤化(傾きの増加)、暗化(全体的に暗くなる)、吸収帯の弱化的の三つが知られている。このような変化は、微小隕石の衝突や太陽風の照射、太陽からの紫外光、宇宙線などにより天体表面の鉱物に光学的な変化をもたらすことが原因と考えられている。これらの宇宙風化を模擬するために、様々な室内実験が行われてきた。しかし、太陽からの紫外光による宇宙風化の影響は示唆されているものの (Kaiden et al., 2019 LPSC No. 2132)、詳細な結果は得られていない。本研究では、紫外光ランプ(朝日分光株式会社製 MAX-303、波長:250~385 nm、放射照度:2.3 W/cm²)を用いて、太陽からの紫外光の照射を模擬して宇宙風化模擬実験を行った。

実験の結果、紫外光照射によって可視光領域でのカンラン石試料の反射スペクトル強度が 30%減少する、宇宙風化作用特有の暗化の変化が見られた。また、赤外領域ではスペクトル強度の変化が見られないことから、スペクトル全体の傾きが急になる赤化も見られた。さらに、カンラン石の試料は非常に短いタイムスケールで変化が現れたものの、すぐに変化が飽和することが分かった。ここから、太陽から 1AU おける天体では、30 日程度のタイムスケールで紫外光による宇宙風化が進行すると考えられる。一方、頑火輝石試料では可視光領域の反射スペクトルは 20%減少したが、240 日程度のタイムスケールでは反応が飽和することはなかった。

高出力レーザーを用いた低プラズマベータ領域における 磁気リコネクション実験

前田 亘佑 中井研究室 (宇宙地球科学専攻)

磁気リコネクションとは、プラズマ中で互いに反平行に配置された磁力線が接近してつなぎ変わり幾何学的な形状の変化を起こす現象である。磁気リコネクションは磁場エネルギーをプラズマの熱および運動エネルギーに変換する過程として重要であり、太陽フレアや地球磁気圏のサブストームなどで観測されている。これまでに、天体観測や大規模計算、磁場閉じ込め装置を用いた室内実験、などによる研究が精力的に行われてきた。近年、ハイパワーレーザーを用いた磁気リコネクション実験が、新たな研究手法として注目されている。レーザー実験では、レーザー条件、使用するターゲットの材質や形状、磁場発生方法などによって、広い領域にわたる磁場強度、イオン種、プラズマ密度・温度・フロー速度を実現することができ、プラズマパラメータを制御しながら、複数の計測器を用いて巨視的な情報と微視的な物理量を同時に得る事ができるという長所を持つ。

本研究では、これまでレーザーを用いた実験例の少ない低いプラズマベータ (β =プラズマの熱エネルギー/磁場エネルギー) 領域において磁気リコネクションを実現し、電子密度・電子温度・フロー速度などのプラズマパラメータ、磁気リコネクションの動的挙動、加速粒子のスペクトルを実験的に求めることを目的とした。そのために、レーザー科学研究所の激光 XII 号レーザーを用いた実験環境の開発を行い、主に CAD を用いて実験セットアップの最適化に取り組んだ。実験では、「キャパシタコイルターゲット」にレーザーを照射することによって反平行配置の高強度磁場を生成して磁気リコネクションを駆動し、プローブレーザーを用いた協同トムソン散乱法によるプラズマパラメータの計測、電子スペクトロメータを用いたエネルギースペクトル計測を行った。

重力マイクロレンズイベントにおけるパラメーター補正を考慮した 検出効率及び伴星分布の導出

戸田 大凱 赤外線天文学グループ (宇宙地球科学専攻)

重力マイクロレンズ現象における伴星の検出効率とは、主星と伴星の質量比 q と主星と伴星の距離 s が与えられたときに、光度曲線上の伴星シグナルが検出できるかどうかを示す指標である。先行研究では、惑星を伴う重力マイクロレンズイベントから惑星の検出効率を求めているが、主星に比べて惑星は質量がはるかに小さいため、伴星による効果を見逃して検出効率を導出している。しかし、この方法では恒星質量の伴星の検出効率を正しく求めることができない。また、重力マイクロレンズ法においてイベントごとの検出効率を考慮した伴星分布の導出を恒星質量まで行っている研究は Shvartzvald et al. 2016 のみであり、この研究でも伴星による効果を見逃して検出効率及び伴星分布を導出している。

そこで本研究では、伴星の効果を検討した検出効率の計算方法を確立した。まずは本研究の検出効率の計算方法と従来の検出効率の計算方法を比べるために、シミュレーションによって 300 個の人工重力マイクロレンズイベントを生成して、検出効率と伴星分布を 2 つの計算方法で求め比較を行った。結果として顕著な差は見えなかったものの、本研究で確立した検出効率の計算方法の方がより正確であることが示された。次に、2018 年に MOA-II 望遠鏡によって観測されたイベントに対してイベントセレクションを行い、本研究の検出効率の計算方法を用いて検出効率及び伴星分布を導出した。結果として $-0.5 < \log q < 0$ 、 $-0.3 < \log s < 0.3$ の範囲で恒星質量の伴星が付随している確率は $16.8^{+7.2}_{-5.2}\%$ と見積もられ、これは Shvartzvald et al. 2016 の結果と 1.5σ で一致する結果となった。この結果は星形成機構を知るうえで重要な成果である。

重力マイクロレンズ法による惑星候補イベント

MOA-2019-BLG-055 の解析

丹羽宏輔 赤外線天文学グループ (宇宙地球科学専攻)

1995年に初めての太陽系外惑星が発見されてから今まで、太陽系外惑星の発見数は5000個を超えた。Microlensing Observations in Astrophysics (MOA) グループでは、ニュージーランドのMt. John 天文台に設置されている広視野望遠鏡を用いて、重力マイクロレンズ法による太陽系外惑星探査を行っている。重力マイクロレンズ法とは、観測している天体（ソース天体）と観測者の間に他の天体（レンズ天体）が通過する際、レンズ天体の重力によってソース天体の光が曲げられ、一時的に増光して観測される現象を利用した太陽系外惑星の発見手法である。この手法は snow line 以遠の惑星や、質量の軽い惑星まで検出感度があるため、他の手法と相補的な探査が行える。しかし、惑星の発見報告は約200例で今後の統計的な議論のためにも発見例を増やすことが重要である。

本研究では、惑星候補イベントである MOA-2019-BLG-055 の解析を行った。光度曲線のフィッティングを行い、ベイズ推定によってレンズ天体の物理量を推定した結果、発見した天体が土星質量程度の惑星を持つ M 型星という惑星系であることが分かった。M 型星のような低質量の恒星周りでは材料不足や時間の補足により、一般的に巨大ガス惑星は形成されにくいと考えられているが、今回の結果はそれに反しており、惑星系形成過程を解明する1つのサンプルになると考えられる。

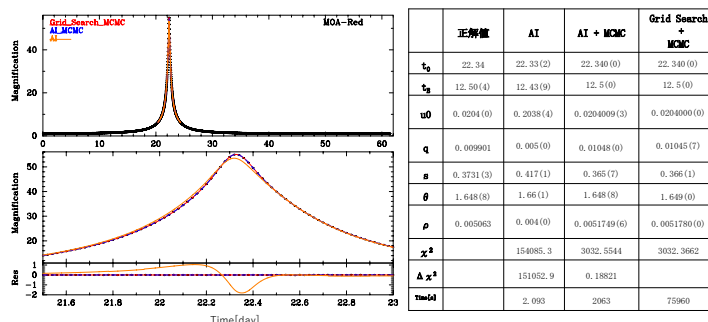
深層密度推定法を用いた重力マイクロレンズパラメータの予測

岡村有紗 住研究室 (宇宙地球科学専攻)

当研究室と連携する MOA グループでは惑星形成過程を解明することを目的とし、重力マイクロレンズ現象を用いた太陽系外惑星探査を行っている。重力マイクロレンズ現象とは、観測者と光源星の間を別の天体が横切った際、天体の重力により光源星の光が曲げられ、増光して観測される現象である。マイクロレンズ解析は観測画像を測光して得られる光度曲線をモデル関数でフィッティングすることで光度曲線を尤もらしく説明することを目的し、最適化には MCMC 法が標準的に用いられている。しかし、マイクロレンズモデルはパラメータ空間が複雑で局所最小値に陥ることが多々あるため、Grid Search によって得られた複数の解を初期値の候補として用いている。そのため、MCMC 法による解析は解析者の技量に依存し、さらに連星/惑星イベントは計算コストが高いためベストモデルを発見するまでに時間を要する。

本研究ではパラメータ空間のグローバルな探索および高速化を図るために、機械学習の一種である深層密度推定法を用いてパラメータを推論し高速にサンプリングすることで、Grid Search を行う代わりに AI による推論値を MCMC 法の初期値候補として使用できるか検討した。

MOA グループが観測するイベントをシミュレートとしたデータに対して比較したところ、精度はほぼ変わらず、解析時間を 97.3%削減することができた。これにより、観測者のバイアスなしの初期値の設定および解析時間の短縮が見込まれる。



広視野近赤外線望遠鏡 PRIME の光学調整

山 響 住研究室 (宇宙地球科学専攻)

我々は重力マイクロレンズ法による太陽系外惑星探査を行っている。重力マイクロレンズ法に適した星の数密度が高い銀河系中心領域はダストが多く可視光は強く減光されるため、観測波長には近赤外線が適している。

我々は世界初の近赤外線による銀河系中心方向の広視野重力マイクロレンズサーベイを行うために、口径 1.8 m の新望遠鏡 PRIME (図 1) を南アフリカ共和国 SAAO に建設した。PRIME のような広視野望遠鏡では、視野全体で光学系の設計性能を達成することが非常に重要であり、サイエンス成果に直結する。そのため、PRIME の全視野で良い光学系になるように光学調整を行う必要があった。そこで、本研究では PRIME が重力マイクロレンズサーベイで主に使用する H-band で光学調整を行う Yama-Cam (図 2) の開発とハルトマンテストを用いた広視野における光学調整法の開発を行った。Yama-Cam の検出器は PRIME の検出器に比べ非常に小さく、一般的に小さい検出器で広視野の光学調整を行うことは困難である。そこで Yama-Cam では検出器をスライドさせる機構を採用し、PRIME の全視野での光学調整を可能にした。また、広視野における光学調整法の開発では、光学系の性能評価方法の一つであるハルトマンテストから波面をフィッティングし、シミュレーション結果と比較することで光学系の修正量の推定を可能にした。2022 年 7 月～8 月、10 月に現地で PRIME の光学調整を行った。



図 2: Yama-Cam

重力マイクロレンズイベント

gb5-R-10-5-207810 の解析

松本翔 赤外線天文学グループ (宇宙地球科学専攻)

私の所属する MOA (Microlensing Observations in Astrophysics) グループは、ニュージーランドの Mt. John 天文台にある口径 1.8 m の MOA-II 望遠鏡を用いて重力マイクロレンズ現象を用いた太陽系外惑星探査を行っている。重力マイクロレンズ現象とは、ある天体 (レンズ天体) が観測している天体 (ソース天体) と観測者の間を通過するとき、ソース天体の光がレンズ天体の重力場によって曲げられることで増光して見える現象である。レンズ天体のアインシュタイン角半径は質量の平方根に比例するため、地球・レンズ天体・ソース天体の位置関係にもよるが、短い時間スケールのイベントほど軽いレンズ天体である可能性が高く、タイムスケールの長いイベントほど重いレンズ天体である可能性が高い。

重力マイクロレンズ法の特徴として、観測対象であるレンズ天体自身の明るさを必要としないという点が挙げられる。つまり、レンズ天体が褐色矮星や浮遊惑星などの非常に暗い天体であっても重力マイクロレンズ法を用いれば発見が可能となる。

本研究ではこの特徴に着目し、重力マイクロレンズ法を用いたブラックホールの発見を目的として重力マイクロレンズイベント gb5-R-10-5-207810 の光度曲線の解析を行った。MOA グループの観測では重力マイクロレンズイベントが起こるとアラートが流れるが、このイベントはアラートが発生せず発見されなかったイベントの一つである。解析の結果、本イベントは $t_E = 184 \pm 7$ 日の長いイベントタイムスケールをもつシングルレンズイベントであることがわかった。また今回のモデルに対してベイズ推定を行い、その結果レンズ天体は地球からの距離が $5.01^{+1.89}_{-3.08}$ (kpc)、質量が $0.79^{+0.63}_{-0.33} (M_\odot)$ であると求められた。

回転振動法を用いた鉱物の磁気異方性測定研究

杉浦 聖也 寺田研究室(宇宙地球科学専攻)

星間の磁場方向を推定する方法として、ダストの部分整列による可視・赤外偏光の観測が、広く用いられている。星や惑星の進化には星雲や天体の磁場が強く関与するが、その理論的なシナリオの構築は、上記偏光の観測データに基づいて進められてきた。しかし弱磁性体(即ち反磁性体および常磁性体)であるダストが、微弱な星間磁場で整列する原因は、完全には解明されていない。弱磁性体のダストが星間の低温条件で示す磁性は、物性理論による説明はされているものの、実験による検証は必ずしも進んでいない。従ってダスト整列を解明するには、星間条件で固体粒子に起こり得る力学的な素過程を、実験に基づいて検討し直す必要がある。その一環として、磁場整列を駆動する基本的なパラメータである磁気異方性 $\Delta\chi$ の測定を、様々な星間物質で行うこととした。

また、星間空間の大多数を占める非晶質シリカは、非晶質であるが故に磁気異方性は持たないとされる。しかし、熔融したシリカが急冷され冷え固まった場合、その急激な温度勾配によって構造に異方性が生じる可能性がある。従って、急冷生成した非晶質シリカの磁気異方性の測定も試みた。

本研究では大きさが $10\times 5\times 1\text{cm}$ や、 $6\times 3\times 1\text{cm}$ のハンドサイズのフェライト磁石やネオジム磁石数枚を用いて小型の磁気回路を作製し、その中に生じる均一磁場空間に鉱物を浮遊させることによって、磁気異方性による回転振動の観測を行う。この回転振動の周期 τ を測定することによって、物質の持つ磁気異方性 $\Delta\chi$ を計測することができる。この装置で用いる実験手法は、過去に用いられてきたトルク法とは異なり、物質の質量を計る必要がない。従って、微小粒子の $\Delta\chi$ を計測することが可能である。実験の結果、クロライトやグラファイト等の $\Delta\chi$ の値が得られた。これらの値は文献値と比較して調和的なものであり、この装置を用いて信頼度の高い $\Delta\chi$ の値を効率的に得る展望が得られた。また、急冷生成された非晶質シリカも同様にして回転振動が観測され、磁気異方性 $\Delta\chi$ の値が得られた。これにより、非晶質シリカは磁気異方性を持っており、磁場整列が起きる可能性のある物質であることが確認できた。

小型 CRDS 装置を用いた水同位体分析

瀧上駿 寺田研究室(宇宙地球科学専攻)

近年のリモートセンシング技術の発達に伴い、月極域付近の永久影部分における水の存在を報告する観測例が挙げられるようになり、月の水探査計画の実現が国際的な競争になっている。月の水資源について探る上で、水分量の情報は非常に重要であり、水の起源を探る上では水同位体分析が有効である。また、従来行われてきたサンプルリターン分析では地球に存在する豊富な水分による汚染が懸念されることから、月面でのその場分析が望ましく、そのため探査機搭載用の小型かつ高精度な分析装置が必要となる。そこで、我々のグループでは月面探査機搭載を想定し、レーザー分光法の一つであるCRDS(Cavity Ring-Down Spectroscopy)を用いた水分量及び水同位体分析装置の開発を行っている。本装置の特長は、市販品と比べて大きさが1/10程度と小型装置でありながら、高精度の測定を行うことができる点である。本研究では、開発した小型CRDS装置の水同位体(HH^{16}O , HH^{18}O)分析における有用性を確かめる実験を行った。

実験を行う上で、最適な波長域の選択を行った。本研究では、 HH^{16}O , HH^{18}O 同位体比の指標である $\delta^{18}\text{O}$ 分析を目的としたため、以下の3つの手順で絞り込みを行った。1) HH^{16}O 吸収強度が大きい(吸収線強度が 1×10^{-24} 以上)。2) 測定範囲(中心波長 $\pm 0.1\text{nm}$)において、 HH^{16}O , HH^{18}O 吸収スペクトルがそれぞれ1つ以上分離して存在する。3) HH^{16}O , HH^{18}O の吸光度比が最も大きい。その結果、 $1391.894\pm 0.1(\text{nm})$ を最適波長域として選択し、 $\delta^{18}\text{O}$ 既知の水サンプル測定に用いた。測定により、 HH^{16}O , HH^{18}O の吸収スペクトルが分離して得られた。得られた吸収スペクトルをVoigt関数によってフィッティングし、吸収面積から $\delta^{18}\text{O}$ を計算した。 $\delta^{18}\text{O}$ の計算値は 1σ の誤差範囲で既知の値と一致する結果となった。以上のことから、本装置の $\delta^{18}\text{O}$ 分析における有用性が示された。

四万十帯日高川層群三尾メランジュにおける 構造地質学的・地球化学的特徴：海溝型地震における断層での 岩石-水相互作用

嶋本朱那 桂木研究室（宇宙地球科学専攻）

本研究では、プレート沈み込みに関連したメランジュユニット内での滑り挙動や、主断層の特徴を理解するために、紀伊半島四万十帯日高川層群美山累層三尾メランジュ内のスリップゾーンを研究対象とした。断層とその周辺の母岩のフィールド調査を実施し、そこで採取したサンプルを用いて、微小構造観察・鉱物組成分析・地球化学的分析・流体岩石相互作用の数値解析的評価・アルバイト化の数値解析的評価を行った。微小構造観察の結果、スリップゾーンでは、複合面構造が発達し、鉱物の粒子やその破片が R_1 面や Y 面に沿って優先的に配列しており、サブミクロンサイズのアルバイト粒子が多く存在している。鉱物組成分析の結果、スリップゾーンは母岩と比較して、石英とイライトの減少、斜長石の増加が確認された。また、地球化学的分析の結果、スリップゾーンでは Sr, Rb, Cs などの流体に濃集しやすい元素の濃度が、母岩と比較して大きく変化をしていることが分かった。これらの元素濃度データを用いた数値解析により、三尾メランジュ内のスリップゾーンでは、アルバイト化を伴う、350 °C 程度の高温での流体-岩石相互作用が生じたことが示唆される。このようなスリップゾーンでの高温流体の発生は、地震時の断層での摩擦発熱によるもので、有効垂直応力を低下させ、急激な動的弱化（熱圧化：thermal pressurization）を引き起こし、大きな海底面の変動及び巨大津波発生を引き起こす可能性がある。

Rock-on-rock 摩擦実験によるインド砂岩の滑り挙動と表面構造発達の 実験的評価

矢野弘道 桂木研究室（宇宙地球科学専攻）

砂岩の摩擦特性を調べるために、これまで多くの室内摩擦実験が実施されてきた。しかし、滑り速度と滑り面の表面構造発達の関係性については、これまで報告されていない。そこで本研究では、インド砂岩の rock-on-rock 形式の摩擦実験を $2 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ から 1 m s^{-1} の広い滑り速度で実施した。高速滑り (1 m s^{-1}) においては、摩擦係数が変動する不安定な挙動を示し、実験後の砂岩ブロックが激しく摩耗し、大きな岩石の破片 (\geq 直径 10 μm) が散在していた。一方で低速滑り ($\leq 1 \times 10^{-1} \text{ m s}^{-1}$) においては、滑りに伴って摩擦係数が徐々に減少し、よく磨かれた鏡面 (fault mirror or slickenside) を形成した。同時に、多くの球状微粒子 (直径 100 nm) が観察された。滑り面の粗さについて、表面粗さ指数を用いて定量的に評価した結果、高速滑り後の滑り面ではハースト指数 0.536, Sdr (展開界面面積率) 219 %, RMS 値 9.6 μm であった。一方で、低速滑り後の滑り面ではハースト指数 0.387, Sdr 44%, RMS 値 1.4 μm となり、高速滑り後の滑り面よりも小さい値を示した。以上の実験・分析結果から、砂岩の摩擦滑り挙動と滑り面の微小構造は滑り速度に大きく依存するといえる。高速滑りでは滑り時にブロックの摩耗を引き起こし、砂粒子の脱落・移動・回転などによりブロック間の噛み合いが生じ、変動する高い摩擦係数を示すと考えられる。一方で低速滑りでは、滑りに伴い球状微粒子の生成と鏡面が形成され、低い摩擦係数を示すと考えられる。本研究で明らかになった砂岩の摩擦滑り特性及び滑り面の表面構造の特徴は、南海トラフ等の砂質なプレート境界断層における地震発生や断層滑り挙動の理解への貢献が期待できる。

Diverse properties of the bZIP-LOV region in each aureochrome subfamily

各オーレオクロームのコア領域の多様な性質

永野 優大 桂木研究室 (宇宙地球科学専攻)

地球上の多くの生物は、太陽光のエネルギーを活用することで生存してきた。その過程で、生物は数多くの光受容タンパク質を進化させてきた。黄色植物である藻類の青色光受容タンパク質であるオーレオクローム (Aureochrome) は、光反応を担う LOV ドメインと DNA と結合する bZIP ドメインから構成され、光に依存した遺伝子発現の制御を司ると考えられている。データベース上には 200 種類以上のオーレオクローム配列が登録されており、系統解析からそれらが 4 つのサブファミリーに分類できることが示されている。しかし、実際に性質が調べられているオーレオクロームは、わずか 3 種類しかない。

そこで、本研究では 4 つのサブファミリーのすべてを持つシオミドロ (*E. siliculosus*) のオーレオクローム (*EsAureol-4*) の bZIP-LOV 領域を大腸菌で作成・単離して解析を行なった。その結果、*EsAureol-4* はいずれも発色団である FMN を LOV ドメイン内に含有して、光反応することが確認された。しかし、それぞれ暗状態・明状態で異なった挙動を示し、光依存的な DNA 結合性の差異が確認されたのは 2 種であった。この研究によって初めて各サブファミリーが比較解析されたことになり、本研究はこの今後のオーレオクローム全体の研究の一助になると考えている。

金属メッシュ上におけるライデンフロスト現象の伝熱特性評価

種子 文也 桂木研究室 (宇宙地球科学専攻)

ある液体の沸点を大幅に超える高温壁面に液滴を落下させたとき、その液滴が可動性をもって浮遊する現象をライデンフロスト現象と呼ぶ。これは、液滴が壁面から熱を受け取り発生させる蒸気によって、壁面と絶縁されることで起こる現象である。ライデンフロスト現象発生の下限温度は滴下する液体の種類やサイズ、壁面状態などの影響を受けて変化することが知られている。壁面側の条件に関して、多孔質壁面などの空隙がある場合にも液滴が浮遊することが知られているが、その浮遊原理については未だ明らかでない部分が多い。壁面にステンレスメッシュを用いた研究では空隙が大きいほどライデンフロスト現象の発生に高い壁面温度が必要であることが示された。しかし、メッシュを構成するワイヤーの太さや材質もまた、液滴への熱の伝達に大きく寄与する重要なパラメータである。そこで本研究では、メッシュ形状および熱伝導率[ステンレス (熱伝導率 $k = 16 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)・真鍮 ($k = 128 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)・銅 ($k = 395 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)]が、ライデンフロスト現象発生の下限温度に及ぼす影響を実験的に調べた。その結果、ステンレスでは先行研究と同様の形状依存性がみられたが、熱伝導率の高い真鍮、銅では顕著な形状依存性は確認されなかった。また、形状および熱物性を複合的に扱いながらライデンフロスト現象発生条件について検討するため、一次元の伝熱モデルを導入した。そして実験の結果をもとに各壁面条件における伝熱量や蒸気量を導出し、液滴浮遊のメカニズムについて検討を行った。

超音波の圧力振動による炭酸水中の泡の成長

各務衣月 波多野研究室（宇宙地球科学専攻）

超音波によって水中で気泡の生成、成長、崩壊（キャビテーション）が発生することはよく知られている。他方、開栓したシャンパンなどの過飽和液体においても超音波を与えると泡が容易に成長していく。このような超音波による泡の活性化を利用した具体例として、ビールに超音波を当てることで泡発生を活性化しきめ細やかな泡を作る機械（サージャー）が挙げられる。このように身近な製品に活用されているにもかかわらず、それがどういった原理で誘起されているのかまだ解明されていない。本研究では、超音波が過飽和液体中で泡の成長を活性化する物理的機構について考察する。

一般的に1つの泡の膨張と収縮運動を表す方程式としてレイリー・プリセット方程式が用いられる。この方程式における泡内部の圧力は、炭酸水中の泡という条件下では一定値にならず、状態方程式により泡内部の温度と二酸化炭素の物質質量に依存する。超音波による激しい圧力振動を受ける場合、熱エネルギーの拡散が泡の収縮膨張運動に追いつかず完全な等温変化にはならない。また液体中の二酸化炭素濃度も拡散が遅れて濃度勾配が生じる。このような物理的過程を移流拡散方程式を用いてモデル化し、レイリープリセット方程式に組み込むことで支配方程式系を導出した。

超音波洗浄機を用いた簡単な実験も行い、周波数が小さいほど泡が活性化されることが分かった（ただし周波数は28kHz, 45kHz, 100kHzの三種類）。この周波数依存性を、導出した支配方程式系の数値計算結果に基づいて考察する。

Fiber Bundle Model を用いたクリープ破壊現象における寿命予測

村上 朔 波多野研究室（宇宙地球科学専攻）

クリープ破壊とは、材料が長期間にわたって応力を受けた場合、その応力が材料の強度より十分に小さい場合でも徐々に変形し、最終的に破断に至る現象である。長い時間を要する現象であるために実験によってデータを大量に得ることは困難なので、シミュレーションで破壊現象を再現し寿命などを理論的に予測することが求められている。近年では Fiber Bundle Model (FBM) と呼ばれる、印加された外力を均等に支える多数の微視的要素（ファイバー）からなるモデルを利用した研究がよく行われており、ひずみ速度の時間発展の再現などがなされている。しかし、寿命の確率分布の特性など、未だ解明されていない重要な点も多い。

そこで、本研究ではFBMの数値シミュレーションを行い、破壊までの寿命分布の特性について調べた。微視的要素の破壊閾値分布としては一様分布及びワイブル分布を仮定した。シミュレーションの結果、応力と材料の寿命の関係として広く知られる Basquin 則や、応力と温度から材料の強度を予測する Larson-Miller の式がこのモデルにおいて成立することが分かった。これらの結果は、クリープ破壊現象が単純化したモデルである程度再現できることを示している。微視的要素の破壊基準に確率的要因を導入した場合は、寿命の分散が構成要素数に反比例することも分かった。このことから、理論上はサイズを大きくするほど系の寿命が揃うと考えられる。

宇宙地球科学専攻

会場：F608

2月9日（木）

レーザー衝撃圧縮を受けた SiO₂ の総合変成評価

大野 正和 近藤研究室 (宇宙地球科学専攻)

衝突現象は惑星形成・進化の素過程の一つとして宇宙地球科学的に重要な現象であり、衝突現象を経験した隕石の中には様々な衝撃変成組織が発見されている。これらの存在から隕石が実際に経験した衝突現象の衝突速度や母天体サイズなどが見積もられているため、衝撃変成鉱物を実験的に回収してその成因を調べることは重要である。我々のグループではこれまで類を見ない 100 GPa 超のレーザー衝撃圧縮を経験した SiO₂ 試料のほぼ完全な回収に成功している[1]。本研究では、その回収試料に対して変成メカニズムの解明を目的として光学顕微鏡、微小領域 X 線回折、走査型電子顕微鏡(SEM)、透過型電子顕微鏡(TEM)といった複数手法を用いた試料観察と衝撃変成の総合評価を行った。光学顕微鏡及び SEM による組織観察の結果、回収試料は衝撃点から順番に領域 I から IV の四つの変成領域に区分できることがわかった。微小領域 X 線回折により SiO₂ の相変化を調べた結果、領域 I では石英の他に高压相のステショバイトが局所的に分布していることがわかった。また、衝撃点からの距離に対する石英の格子体積及び回折ピークの半値全幅の変化を調べた結果、格子体積は領域 I~II で、ピーク半値全幅は領域 I~III で値が増加していることがわかった。これらの詳細な観察結果から衝撃変成の分類と変成メカニズムを考察した内容について発表する。

[1] K. Nagaki *et al.*, *Meteorites & Planetary Science*, **51**, 1153-1162 (2016)

Amorphization mechanism and kinetics of fine-grained bridgmanite polycrystalline in shocked meteorites

Si Jin 近藤研究室 (宇宙地球科学専攻)

High pressure and temperature generation induced by impact events can cause phase transition of constituent minerals to their high-pressure polymorphs. The occurrence of bridgmanite in shocked meteorites suggests that the pressure above 23 GPa was generated during the impact process. However, the high-pressure minerals become a metastable state immediately after the pressure release. Owing to the high temperature just after the pressure release (post-shock temperature), bridgmanite grains often disappear due to amorphization. Therefore, the residual post-shock temperature should be a key parameter that determine whether high pressure minerals can survive or not in shocked meteorite. In this study, amorphization mechanism and kinetics of polycrystalline bridgmanite with different grain size were studied at high temperatures up to 1080 K. High-temperature time-resolved synchrotron X-ray diffraction measurements showed that the significant volume expansion due to the temperature-induced amorphization causes static stress, which hinders the amorphization from progressing. The temperature required for the amorphization for fine-grained bridgmanite was approximately 100-200 K higher than for the coarse-grained bridgmanite. The intracrystalline amorphization mechanism found in coarse-grain bridgmanite (Nishi *et al.*, 2022) probably reduced the amorphization temperature. Considering the small grain size in natural bridgmanite, the data from fine-grained sample is more suitable for the estimation of the residual post-shock temperature.

高圧下液体水の屈折率測定

橋本佳依 近藤研究室 (宇宙地球科学専攻)

近年の衛星探査による観測結果から、太陽系内の多くの氷衛星には表層の氷の下に内部海の存在が示唆されている。内部海にはいくつかの塩類が含まれていると考えられており、その温度・圧力条件によって内部海中に高圧氷や水和物が生成された、固液共存状態が存在していると考えられる。内部海環境のような高圧下における水溶液の密度や電磁気学的な物性は液体の屈折率とも強い相関があるため、圧力下における屈折率を知ることは非常に重要である。高圧力下における透明試料の屈折率の測定方法は、透明な窓を持つ高圧装置であるダイヤモンドアンビルセル (DAC) を用いたいくつかの手法が存在するが、いずれも複雑な光学系の設置が必要である。本研究では、自由に回転できる DAC に可視レーザー光を斜め入射させ、透過光とダイヤ-試料境界面で屈折・反射させた光の位置関係を精密に測定することで透明試料の屈折率が測定できる非常に簡便な手法の開発をおこなった。本手法では DAC を使用した各種実験における問題点の一つである試料長の測定を必要としないため、他の手法の補完実験としても期待できる。

液滴の粉体層衝突におけるターゲット依存性評価

氏名 張 韡 桂木研究室 (宇宙地球科学専攻)

液滴の粉体層への衝突に関する実験的な研究を行った。この現象は、農学から惑星科学まで幅広い分野で見られるが、流体と粉体という二相が複雑に相互作用するため、詳細な物理は明らかになっていない。これまで、液滴の衝突速度や直径などを変化させた場合の挙動変化を調べる研究は行われてきたが、粉体ターゲット側の物性条件依存性に注目したものはほとんど実施されていない。本研究では、粉体層の構成粒子径 d_p と含水率 w を系統的に変化させて以下の実験を行い、それらの依存性を評価する。1. 高速度カメラを用いた衝突現象の観測、2. 粉体ターゲットの力学的特性量の計測。3. 粒子追跡法を用いた、衝突により噴出する粒子 (イジェクタ粒子) の計測。4. クレータープロファイル測定。1 の結果、ターゲットのパラメータを変化させることで、液滴のスプラッシュ・イジェクタ粒子発生の有無に差が現れたため、衝突現象を4つの相に分類した。さらに、2 では、粉体層の実効的な強度・弾性率を求め、ターゲットが持つ力学的な特性が相の決定にどのように寄与するのか調べた。また、3 では各イジェクタ粒子の噴出位置・速度を計測することで、液滴の粉体層への侵入や粉体粒子へのエネルギー輸送を議論している。最後に、4 においてクレーターから液滴の拡張や粉体表層の掘削に関する情報を取得した。以上から得られた様々な結果を複合的に考察することで、液滴・粉体層衝突の基礎物理に対する理解の深化を目指す。

理想団粒土壌における保水及び乾燥の粒径依存性評価

保田彪賀 桂木研究室 (宇宙地球科学専攻)

天然土壌には小さな粒子が有機物を介して結合し1つの複合粒子となった団粒と呼ばれる階層構造が存在する。これまで、天然土壌における保水や乾燥機構解明のため、ガラスビーズで構成されるモデル土壌を用いた研究が多くなされてきた。土壌構造の模擬にガラスビーズを用いることの利点は、土壌の構造依存性に着目しその他の複雑な因子を排除できることである。しかし、ガラスビーズの集合体には団粒のような階層構造が存在しないため、これまでのモデル土壌を用いた研究では天然土壌における団粒の効果は考慮されてこなかった。

そこで、本研究では、階層構造(団粒)を持つモデル土壌を作成し、降水に見立てた条件下で保水・乾燥実験を行った。モデル団粒にはガラスビーズの焼結体を用い、ふるい分けによって粒径区分した。ここで、このモデル団粒は、団粒自体の大きさ D と団粒を構成するガラスビーズ径 d という2つの粒径パラメータを持つ。団粒試料(乾燥状態)は上面が開口、下面がメッシュになった容器に入れられ、その後初期条件として定量の水が試料表面に霧状散布された。つまり、加えられた水の一部はモデル土壌内の空隙に保水され残りの水は下のメッシュから排水される。試料重量と排水量をそれぞれ個別に電子天秤で測定し、その後保水された水のすべてが蒸発するまで試料重量の時間変化を測定した。

実験の結果、すべての試料に関して排水は初期の加水停止後数分で終了し、残りの保水量は蒸発のみによって数十時間のオーダーで乾燥するという挙動が確認された。初期の保水量は d に関して単調減少し、 D に関しては $D=500\ \mu\text{m}$ あたりで極大を持つことがわかった。その後の蒸発過程では、初期に蒸発速度が一定で乾燥する領域があり、その後蒸発速度が低下していく領域が確認された。発表では、この蒸発過程の推移位置やその時点での保水量の粒径依存性についても、空隙の水飽和度と関連付けて議論する。

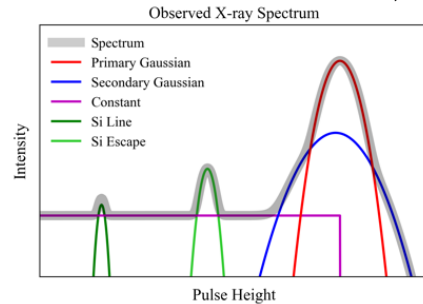
XRISM/Xtend 搭載 CCD 検出器の相対位置の評価と応答関数の構築

大出優一 松本研究室 (宇宙地球科学専攻)

我々は2023年度打ち上げ予定のX線天文衛星XRISMに搭載される軟X線撮像装置Xtend用の焦点面CCD検出器(SXI)の開発を行っている。軌道上観測に向け、4枚のCCD素子の焦点面での位置を詳細に把握しておく必要がある。そこで我々は、CCD素子の直上に金属製のメッシュを設置し、メッシュを通して55FeからのX線を照射することで、格子状の影を撮像した。この影絵の回転と射影を考えCCD素子の相対位置の評価を行った結果、X線源とメッシュカバーの距離が近いことによる拡散光の影響と、メッシュカバーが撓むことによるメッシュの影の変形という問題を発見した。そこで、カウント分布をフラットにする補正や解析に用いる領域の選定を導入し、CCD素子の相対位置を19秒角の精度で決定できた。また、CCDによる観測データを天体の情報に焼き直すためには、入射X線と信号波高値の関係(ゲイン)や、単色X線が入射した際にスペクトルに現れる複雑な形状(ラインプロファイル)を、地上試験のデータを用いて補正し、入射X線に対する応答を精度良く再現できる応答関数を用意する必要がある。そこで

私は、3種の地上試験のデータを用いて応答関数の構築と評価を行った。ゲインについては、要求を満たす補正に成功した。ラインプロファイルは、右図の5つの成分で構成される(Inoue et al. 2016)。本研究では、前身であるHitomi/SXIのラインプロファイルをベースにPrimary, Secondary, Constantを再検討した。その結果、XRISM/SXIのSecondary, Constantのエネルギー依存性が、同一設計のHitomi/SXIのそれと異なることが判明したため、ラインプロファイルの作成に取り入れた。

以上を踏まえて、XRISM/SXIの応答関数を構築した。



XL-Calibur 搭載硬 X 線望遠鏡の開発と性能評価

鴨川航 松本研究室 (宇宙地球科学専攻)

我々は、日本・アメリカ・スウェーデンの共同で行われる硬 X 線偏光観測気球実験計画 XL-Calibur に搭載する、硬 X 線望遠鏡(Hard X-ray Telescope, HXT)の開発を担当している。本望遠鏡の焦点距離は 12m であり、焦点面に設置した Be 散乱体により散乱された X 線 CdZnTe 半導体検出器 (CZT 検出器) で捉えることで偏光観測を行う。HXT は望遠鏡の反射鏡面に Pt/C 多層膜スーパーミラーを用いることで 80keV までの高いエネルギーの X 線 (硬 X 線)を集光・結像する光学系である。また、HXT は円錐近似した Wolter-I 型光学系を採用しており、直径 45cm の望遠鏡筐体に、厚さ 0.22mm の薄型反射鏡を 1278 枚積層した多重薄板型構造を持つ。反射鏡は櫛歯状のアラインメント・バーにより保持されており、反射鏡の動径方向の位置はこのバーによって決まる。我々の研究グループでは、2020 年 12 月までに大型放射光施設 SPring-8/BL20B2 ビームラインにおいて望遠鏡に X 線を当て、反射像を見ながらアラインメント・バー位置の調整作業 (光学調整)を実施した。2021 年 6 月には SPring-8/BL20B2 で性能評価実験を実施した。望遠鏡の主な性能には結像性能と集光力があり、それぞれ HPD (Half Power Diameter) と有効面積を指標に評価を行った。今回の性能評価試験の結果、30keV、50keV での結像性能はともに 1.8 分角 (予想性能は約 2.0 分角) であり、有効面積はそれぞれ $172.60 \pm 0.08 \text{ cm}^2$ 、 $72.81 \pm 0.06 \text{ cm}^2$ であった。これは、目標であった前身の X-Calibur 搭載望遠鏡から 5 倍の集光力を達成する結果であり、目標を達成している。また、有効面積の離角依存性を測定し、そこから望遠鏡の視野を見積もったところ 5.9 分角であった。更に、性能評価試験で取得した望遠鏡の局所的な有効面積や反射像の広がりなどの詳細な評価を行った。また、性能評価を終えた HXT を XL-Calibur 気球の打ち上げ地であるスウェーデンのエスレンジ宇宙センターに輸送し、取り付け作業を完了した。

NuSTAR 衛星による SN1987A 観測中に認められた セレンディピタスソースの研究

佐藤 淳矢 松本研究室 (宇宙地球科学専攻)

NuSTAR 衛星は 2012 年に NASA が打ち上げた X 線天文衛星であり、3 - 79 keV の硬 X 線帯域に高い感度を持つ。NuSTAR 衛星は 2012 年 9 月から 2014 年 8 月にかけて 23 回、2020 年 5 月に 4 回、計 2 Ms に渡って SN1987A の観測を行っている。我々はこれらの観測データを解析していたところ、(RA, Dec)_{J2000} = (5 : 35 : 26.7, -69 : 13 : 38.8) に正体不明の天体が映っていることを発見した。該当する座標における他の衛星の観測を調べたところ、Chandra 衛星と XMM-Newton 衛星でそれぞれ 2CXOJ 053525.4-691347、4XMM J053525.8-691348 という天体の存在が確認されており、これは NuSTAR で観測された天体と同一天体であると考えられる。当該座標に位置する天体は Lopez+(2020) でもバックグラウンドソースとして言及されており、チャンドラソースカタログの 0.3-8 keV でのフラックス $8.25 \times 10^{-15} \text{ erg/s/cm}^2$ が報告されている。しかしスペクトルフィットは行われておらず、天体の種族も不明とされている。そこで我々は、この天体の正体を明らかにすべく、NuSTAR、Chandra、XMM-Newton などの観測データを解析した。その結果、スペクトルは 3keV 以上で支配的な硬 X 線成分と、3keV 以下で支配的な軟 X 線成分の 2 成分からなることがわかった。硬 X 線成分は水素柱密度 $N_{\text{H}} = 1.04 \pm 0.08 \times 10^{23} \text{ cm}^2$ の強い吸収を受けており、3 - 10 keV において $(8.3 \pm 0.7) \times 10^{-14} \text{ erg/s/cm}^2$ というフラックスを持つことが明らかになった。一方、軟 X 線成分は $N_{\text{H}} = 2.62 \times 10^{21} \text{ cm}^2$ 程度の吸収しか受けておらず、0.5 - 3keV でのフラックスが $(4.9 \pm 1.7) \times 10^{-16} \text{ erg/s/cm}^2$ とわかった。また、軟 X 線成分の 0.5-10keV のフラックスは、硬 X 線成分のその 100 分の 1 しかない。可視光、赤外線、電波での観測も考慮すると、この天体が AGN 乃至は X 線連星系である可能性が高いことが分かった。

NuSTAR 衛星で観測された硬 X 線恒星フレアの起源に関する研究

袴田 知宏 松本研究室 (宇宙地球科学専攻)

恒星フレアは、恒星表面のコロナにおいて磁気リコネクションが起こることで、突発的 ($\sim 10^2 - 10^4$ s) にエネルギーが解放される現象である。解放されたエネルギーはコロナプラズマの運動エネルギーに変換され、最終的に磁気ループに蓄えられたプラズマが X 線帯域で熱制動放射をする。恒星フレアのうち最も詳細に観測されているのは太陽フレアであるが、X 線帯域で太陽フレアの $10^3 - 10^6$ 倍の光度を持つ大規模なフレアを発生させる恒星も多く確認されている (e.g. Tsuboi et al. 2016)。

2013 年 4 月 25 日、硬 X 線観測衛星 NuSTAR のマグネター 1E2259+586 観測時、同視野内 (RA, Dec)=(23:00:59.9, +58:57:25.9) の位置に約 100 s で増光し、400 s 程度で減衰した X 線突発天体が検出された。この突発天体の X 線観測データ解析の結果、6.7 keV の He 状鉄輝線が検出され、スペクトルは熱的制動放射で再現された。さらに、Chandra や XMM-Newton などでも観測された X 線スペクトルの解析により、静穏時のフラックスなどのパラメータが得られた。その結果、フレア時のフラックスは静穏時の 400 倍程度であった。また、突発天体と同位置に可視光・赤外線天体を同定した。GAIA 衛星による年周視差から距離を計算したところ 281 pc であり、これを用いることでスペクトルエネルギー分布 (SED) が温度 3336 ± 27 K、放射体半径 $1.03 \pm 0.24 R_{\odot}$ の黒体放射で再現された。これより、観測された突発天体は恒星フレアであることが示唆され、フレアの X 線光度は $1.26^{+0.17}_{-0.15} \times 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$ (@0.5 - 10.0 keV) であった。

X 線観測データから得られた結果を用いて、観測されたフレアの機構について議論する。さらに、可視光・赤外線観測得られた結果も加えて先行研究を比較することで、恒星の種類についても議論を行う。

二次元粉体振動層における内部応力構造と粉体挙動

飯川 直樹 [所属：現) コマツ、旧) 桂木研究室(名大環境 地球環境科学専攻)]

惑星表面の多くはレゴリスのような粉体によって覆われている。そのような惑星表面では、断続的な隕石衝突を起源とした振動により多様な地形が形成される。そこで本研究では、断続的な振動によって生じる粉体層の振る舞いと、その際の内部応力状態に着目した。

実験には、光弾性素材を加工した円柱状粒子(小：直径 10 mm、大：直径 15 mm、厚さ 10 mm)を実験容器に積層した準 2 次元の粉体層を使用した。そして、実験容器に対して鉛直方向に振幅と周波数をコントロールしたタッピング(1 周期の波)を 2 秒間隔で断続的に加えた。その際の、粒子配置を推定可能な明視野画像(図 a)、粉体層内を伝播する応力状態を可視化した暗視野画像(図 b)の 2 種類の画像を取得した。

解析では、粒子挙動の解析に加え、粒子 1 個あたりに加わっている力を推定する手法と、粉体層を伝播する鎖状の応力(応力鎖)の方向・長さを定量的に評価する手法を使用し、応力鎖を定量的に評価した。

その結果、初期状態では重力方向に近い状態で形成された鎖状構造が、強いタッピング条件下では無秩序な構造に変化(水平方向に応力鎖が発達)することが明らかになった。さらに、粒子に加わる力を解析することで、無秩序な構造になるにつれて粒子に加わる力も増加する傾向にあることも明らかになった。

この時の粒子挙動を調べると、粒子が実験容器の中央で上昇し、容器側面で下降する対流のような挙動(粉体対流)が生じていた。この粒子挙動が容器内の下層で生じていた応力鎖の水平方向の発達の要因と考えられる。

当日の発表では、自己紹介ならびに上記の修士課程での研究、博士課程入学後の研究内容についてもお話しする。

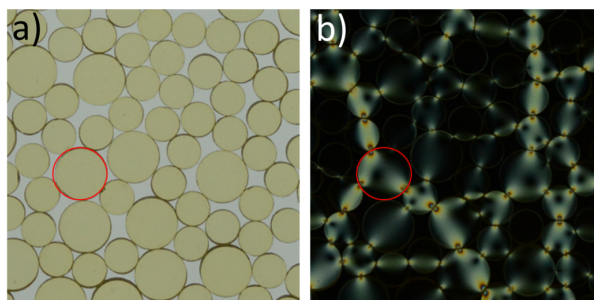


図 a.明視野画像 b.暗視野画像 赤丸は同じ粒子を表す

磁気流体シミュレーションを用いた遷移円盤周りにおける 星風構造の調査

海野 真輝 長峯研究室 (宇宙地球科学専攻)

原始惑星系円盤の進化は中心の星にエネルギー的に支配されているため、星が円盤に与える影響を把握しきることが円盤進化の理解に重要になる。過去の円盤進化に関する研究では、中心の星を重力源・光源として考慮していたが、中心の星からは星風と呼ばれる超音速のプラズマ流も放出されている。そのエネルギー放出率は星の光度に匹敵しうるため、円盤進化における星風の重要性を評価する必要がある。しかし、過去の研究で星風が十分考慮されてこなかった背景には、星風質量放出率が観測から十分に制約されていないことに一部起因する。そのため、星風が円盤進化に与える影響と星風質量放出率の観測可能性の調査の両方が必要である。これらの点を調査するために、我々は遷移円盤と呼ばれる穴が空いた円盤が星風にさらされている状況を、磁気流体シミュレーションを用いてパラメータ調査を行った。結果、星風は円盤内縁から上空にかけて衝撃波を形成し、その後面には円盤の散逸を駆動できる極端紫外線 (EUV) を放射可能なプラズマの空間分布が得られた。しかし、調査したパラメータ領域では、衝撃波後面の EUV 光度は星の光度より十分低い結果となった。衝撃波後面から円盤表面に照射される EUV フラックスも、星由来のフラックスより十分低い結果となった。また、星風質量放出率を観測から制限できるかどうかを検討するために、衝撃波後面の熱構造についての調査も行った。

ダークマター欠乏銀河の形成過程における力学的摩擦の影響

片山諒介 宇宙進化研究室 (宇宙地球科学専攻)

van Dokkum et al. (2018) がダークマター欠乏銀河を初めて発見してから、ダークマターの性質をテストする材料としてダークマター欠乏銀河に関する研究が盛んにおこなわれてきた。ダークマター欠乏銀河とは、星質量とダークマター質量がほぼ同じか、星質量の方が大きいという、一般的な銀河とは真反対の性質を持つ銀河のことである。ダークマター欠乏銀河の形成過程には2つのシナリオが考えられる。それは潮汐シナリオと衝突シナリオである。潮汐シナリオとは、ある銀河が自分より大きなハローから強い潮汐力を受けてダークマター質量を大きく失ってダークマター欠乏銀河になる、というシナリオである。潮汐シナリオがダークマター欠乏銀河を形成することは Ogiya (2018) によって示された。しかしながら、Ogiya (2018) のN体シミュレーションは、潮汐力を生む host ハローがN体ではなく解析的なポテンシャルとして実装されていた。

本研究では、これによって力学的摩擦が無視されてしまうことに着目し、satellite 銀河だけでなく host ハローもN体とした自己無撞着なN体シミュレーションを実施し、host ハローが解析的なポテンシャルとした場合のシミュレーション結果と比較することで、潮汐シナリオに対する力学的摩擦の影響を調べた。

結果として、力学的摩擦は単位時間あたりに銀河が受ける潮汐作用を増幅することが分かった。これは、主に力学的摩擦が satellite 銀河の軌道周期を短くさせるためである。

このことから、これまでに提案された軌道よりも離心率が小さい軌道によってダークマター欠乏銀河が形成されることが結論付けられた。これはダークマター欠乏銀河の形成確率を上げるかもしれない。

太陽フレアの乱流の起源に関する三次元磁気流体シミュレーション研究

柴田 健吾 長峯研究室 (宇宙地球科学専攻)

太陽フレアにおけるループトップ領域は高エネルギー電子の生成に重要な寄与をすることで注目されている場所である。ひので衛星の極端紫外線撮像分光観測により、ループトップ領域には乱流を示唆するライン幅の増加が見られることが明らかになった。この乱流は磁力線をかき乱すことでループトップにおける電子の閉じ込められ方・加速のされ方に影響を与えると考えられるが、この点を詳細に議論するためには、この乱流がどこで・どうやって生じるかなど大域的な乱流の性質を理解することが必須である。我々は三次元の磁気流体シミュレーションを実施しループトップの乱流の起源を調べた。その結果、ループトップ領域に形成される磁力線の曲率が大きい場所で、圧力駆動不安定性やプラズマ流の遠心力によって引き起こされる Rayleigh-Taylor 不安定性が発達することを発見した。我々はこれらの不安定性が過去研究で考えられていたリコネクションアウトフローの下端で生じる不安定性よりも速く発達することを示し、乱流の起源であると結論した。我々の結果はこれまでの研究で考えられていた以上に高速で乱流が発達し得ることを意味し、フレアループ形成直後における電子加速に対して乱流が与える影響を無視できないことを示唆した。

極金属欠乏矮小銀河の形成と進化

戸丸 一樹 長峯研究室 (宇宙地球科学専攻)

極金属欠乏矮小銀河は、ガスの金属量が著しく低い ($Z < 0.1 Z_{\text{sun}}$) ため、初代銀河を始めとした初期宇宙の銀河のローカルアナログとして期待されている。したがって、極金属欠乏矮小銀河は宇宙初期における星形成プロセス、例えば始原的なガスの降着などを知る窓を提供する可能性がある。しかし、極金属欠乏矮小銀河の形成と進化には、非効率的な星形成、銀河風による金属の排出、金属に乏しいガスの降着など、他のプロセスの存在も観測的に示唆されている。

本研究では、極金属欠乏矮小銀河の星形成とその低い金属量の起源を調べるために、宇宙論的流体シミュレーションコード GADGET3-Osaka (Shimizu et al. 2019) を用いて極金属欠乏矮小銀河のシミュレーションを行った。研究の結果、ズームイン宇宙論的流体力学シミュレーションにおいて、孤立した環境での極金属欠乏矮小銀河の形成に成功した。極金属欠乏矮小銀河のガス流出・流入と星形成の歴史を調べたところ、シミュレーションされた極金属欠乏矮小銀河は、定常的に進化する際に、星形成率の増加を伴いながら連続的に質量流入をしていることが明らかになった。

幾何学的に厚いブラックホール降着円盤における磁束輸送の理論研究

山本 凌也 長峯研究室 (宇宙地球科学専攻)

X線連星や活動銀河核の観測から放射不良降着流 (RIAF) や超臨界降着円盤といった幾何学的に厚い円盤の存在が示唆されており、これらの厚い円盤では磁気駆動と考えられるアウトフローが観測される。しかし厚い円盤におけるアウトフローを駆動しうる磁場の形成過程はよく知られていない。そこで我々は二次元軸対称球座標系での運動論的磁束輸送コード (以下 2D モデル) を作成し、厚い円盤における磁場の半径・鉛直分布を調べた。背景場を決める円盤モデルには RIAF と超臨界降着円盤の解析解を採用した。2D モデルと従来の一次元モデルとの結果を比較すると、2D モデルでは磁場がより拡散的にふるまい、中心近傍の磁場強度や円盤表面における磁場の傾きが小さくなることがわかった。また我々は磁気プラントル数 $P_m \equiv \text{粘性係数}/\text{磁気拡散係数}$ に対するパラメータサーチを行い、磁気遠心力によるアウトフローが駆動されるために必要な P_m を見積もった。さらに RIAF が Magnetically Arrested Disk と呼ばれる強く磁化した状態になるための外部磁場強度を制限した。本発表ではこれらの結果について述べ、ダイナモ効果を含んだ磁束輸送計算へ向けたモデルアップデートの進捗状況も述べる。