

2023 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 6 年 2 月 13 日(火)・14 日(水)

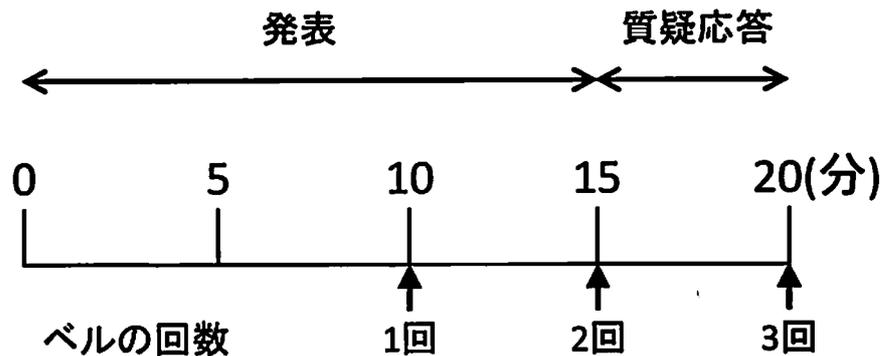
目次

● 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13日)	10
・ 物理学専攻 素粒子・原子核グループ (2月14日)	18
・ 物理学専攻 物性グループ (2月13日)	25
・ 物理学専攻 物性グループ (2月14日)	35
・ 宇宙地球科学専攻 (2月13日)	43
・ 宇宙地球科学専攻 (2月14日)	54

[連絡事項]

発表について

- 発表時間
ひとりあたりの持ち時間は、質疑応答5分を含めて20分です。



- 発表スライド・機器の準備
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14日(水) 16:00～

会場：H701, Zoom (ハイブリッド)

※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13日(火)、14日(水)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13日(火)の最後のタイムキーパーの方へ
13日(火)の発表会終了後、14日(水)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、他を専用のビニールバッグに入れて渡してください。
- 2月14日(水)の最後のタイムキーパーの方へ
14日(水)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、他を専用のビニールバッグ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(黒木研)：
植田涼太、神山周、高橋佑瑚、宮本英雄(Ext. 6750, 6751)
- 宇宙地球科学専攻(佐々木研)：
江頭勇介、佐藤龍成、出口大、中本朝子(Ext. 5803)

素粒子・原子核グループ(会場:H701)
2月13日(火)

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	10:20	山岡 起也	大野木 哲也	10	○	大野木哲也	西岡辰磨	山口 哲		【青木研】 蔭山裕士
	10:40	安藤 恵一	西岡 辰磨	10	○	西岡辰磨	大野木哲也	山口 哲		
	11:00	藤村 晴伸	西岡 辰磨	11	○	西岡辰磨	兼村晋哉	深谷英則		
	11:20	栗林 志恩	青木 正治	11		上野一樹	青木正治	南條 創		
	休憩									
西岡	12:40	荒木田 陸斗	南條 創	12	○	南條 創	川畑貴裕	上野一樹		【南條研】 森岡樹
	13:00	川田 悠統	南條 創	12	○	南條 創	青木正治	石川貴嗣		
	13:20	久郷 莉奈	南條 創	13	○	南條 創	青木正治	廣瀬 穰		
	13:40	柴田 哲平	南條 創	13		南條 創	佐藤亮介	吉田 斉		
	休憩									
青木	14:20	北尾 紫洸	浅川 正之	14	○	浅川正之	保坂 淳	赤松幸尚		【黒木研】 植田涼太
	14:40	平岩 義寛	浅川 正之	14		浅川正之	石井理修	赤松幸尚		
	15:00	杉崎 堯人	福田 光順	15		福田光順	川畑貴裕	三原基嗣	溝井 浩	
	15:20	田口 諒	福田 光順	15	○	川畑貴裕	民井 淳	福田光順		
	15:40	橘高 正樹	福田 光宏	16		福田光宏	青木正治	依田哲彦		

素粒子・原子核グループ(会場:H701)
2月14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
兼村	9:00	白井 竜太	吉田 斉	18		吉田 斉	川畑貴裕	民井 淳		【川畑研】 坂上宗樹
	9:20	宇田 隆佑	阪口 篤志	18		阪口篤志	川畑貴裕	白鳥昂太郎		
	9:40	林 双葉	阪口 篤志	19		阪口篤志	川畑貴裕	白鳥昂太郎		
	10:00	本多 祐也	川畑 貴裕	19	○	川畑貴裕	小田原厚子	民井 淳		
	休憩									
保坂	10:40	松井 昇大朗	福田 光宏	20	○	福田光宏	川畑貴裕	神田浩樹		【川畑研】 西川隆博
	11:00	宮本 憲伸	野海 博之	20		野海博之	川畑貴裕	石川貴嗣	白鳥昂太郎	
	11:20	佐藤 新悟	細貝 知直	21	○	細貝知直	川畑貴裕	金 展		
	11:40	築道 拓実	藤岡 慎介	21		藤岡慎介	有川安信	民井 淳		
	休憩									
阪口	13:00	GUOHAO YING	兼村 晋哉	22	○	兼村晋哉	西岡辰磨	佐藤亮介		【素論研】 蓬郷修一郎
	13:20	谷口 宙	兼村 晋哉	22	○	兼村晋哉	南條 創	柳生 慶		
	13:40	山中 拓夢	兼村 晋哉	23	○	兼村晋哉	大野木哲也	佐藤亮介		

2月14日(水)16時～18時頃 判定会議:H701(ハイブリッド)
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13日(火)

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
菊池	9:00	梶 昌孝	Slevin, Keith	25	○	黒木和彦	浅野建一	Slevin, Keith		【浅野研】 松木海登
	9:20	相田 哲明	黒木 和彦	25		黒木和彦	越野幹人	越智正之		
	9:40	八木 俊輝	黒木 和彦	26		黒木和彦	松野丈夫	越智正之		
	10:00	大江 海静	浅野 建一	26	○	浅野建一	越野幹人	黒木和彦		
	10:20	兵頭 周	浅野 建一	27		浅野建一	越野幹人	越智正之		
	休憩									
兼松	11:00	五十嵐 勇治	越野 幹人	27		越野幹人	黒木和彦	花咲徳亮		【越野研】 園悠希
	11:20	河岡 巧真	越野 幹人	28		越野幹人	越智正之	松野丈夫		
	11:40	YUFEI LIU	越野 幹人	28		越野幹人	浅野建一	Slevin, Keith		
	休憩									
黒木	13:00	織戸 悠輔	菊池 誠	29		吉野 元	菊池 誠	波多野恭弘		【菊池研】 吉田桃大
	13:20	丸山 恭史	菊池 誠	29		菊池 誠	吉野 元	湯川諭		
	13:40	杉原 弘基	木村 真一	30		木村真一	工藤一貴	中村拓人		
	14:00	湯田 秀明	大岩 顕	30	○	大岩 顕	越野幹人	藤田高史		
	休憩									
浅野	14:40	須崎 洋岳	工藤 一貴	31		工藤一貴	松野丈夫	木田孝則		【工藤研】 岡宏大
	15:00	花田 洸志	工藤 一貴	31		工藤一貴	花咲徳亮	新見康洋		
	15:20	真鍋 馨	工藤 一貴	32		工藤一貴	竹内徹也	鳴海康雄		
	15:40	守安 悠人	工藤 一貴	32		工藤一貴	越智正之	蔭 男		
	16:00	和田 大輝	工藤 一貴	33		工藤一貴	萩原政幸	竹内徹也	塩貝純一	

物性グループ(会場:D403)

2月14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
木村	9:00	三川 基	鳴海 康雄	35		鳴海康雄	工藤一貴	萩原政幸		【萩原研】 井上祥
	9:20	森本 大幹	萩原 政幸	35		萩原政幸	花咲徳亮	木田孝則		
	9:40	厚美 竜二	松野 丈夫	36		松野丈夫	宮坂茂樹	塩貝純一		
	10:00	沖本 稜弥	松野 丈夫	36		松野丈夫	新見康洋	上田浩平		
	10:20	小林 友祐	松野 丈夫	37		松野丈夫	浅野建一	塩貝純一		
	休憩									
花咲	11:00	西澤 正崇	兼松 泰男	37		兼松泰男	豊田岐聡	松野丈夫		【松野研】 大森晟矢
	11:20	岡田 茉樹	豊田 岐聡	38		豊田岐聡	久富 修	大塚洋一		
	11:40	鈴木 舜也	豊田 岐聡	38		豊田岐聡	新見康洋	大塚洋一		
	休憩									
豊田	13:00	岩瀬 圭祐	花咲 徳亮	39		花咲徳亮	萩原政幸	村川 寛		【花咲研】 見里朝彦
	13:20	宮本 雄哉	花咲 徳亮	39		花咲徳亮	酒井英明	蔭 男	村川 寛	
	13:40	古谷 大樹	花咲 徳亮	40		花咲徳亮	南谷英美	村川 寛		
	14:00	浅間 遼太郎	新見 康洋	40		新見康洋	花咲徳亮	高田真太郎		
	14:20	前田 将輝	新見 康洋	41		新見康洋	工藤一貴	高田真太郎		

2月14日(水)16時~18時頃 判定会議:H701(ハイブリッド)
教授、准教授、及び審査委員の助教 全員出席

宇宙地球科学専攻(会場:D303)
2月13日(火)

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
住	9:00	土草 一輝	桂木 洋光	43		桂木洋光	久富 修	湯川 諭			【桂木研】 越智 友都
	9:20	福本 健	桂木 洋光	43	○	桂木洋光	久富 修	波多野恭弘			
	9:40	山本 侑樹	桂木 洋光	44		桂木洋光	山本 憲	佐々木 晶			
	10:00	佐々木 勇人	桂木 洋光	44	○	桂木洋光	久富 修	波多野恭弘	近藤 忠	西 真之	
	休憩										
近藤	10:40	友善 瑞雄	住 貴宏	45		住 貴宏	増田賢人	野田博文			【住研】 坂東 賢
	11:00	濱田 龍星	住 貴宏	45	○	住 貴宏	増田賢人	松本浩典			
	11:20	藤田 捷暉	住 貴宏	46		住 貴宏	鈴木大介	小高裕和			
	11:40	山下 寛介	住 貴宏	46		住 貴宏	鈴木大介	井上芳幸			
	休憩										
佐々木	12:20	陣内 創	寺田 健太郎	47	○	寺田健太郎	横田勝一郎	近藤 忠			【寺田研】 炭谷 拓真
	12:40	秋吉 遥己	寺田 健太郎	47		寺田健太郎	横田勝一郎	桂 誠			
	13:00	大西 亮	寺田 健太郎	48		寺田健太郎	横田勝一郎	福田航平	高棹真介		
	休憩										
桂木	14:20	前田 和輝	佐々木 晶	48		佐々木晶	大高 理	寺田健太郎			【佐々木研】 佐藤 龍成
	14:40	小山 真矢	佐々木 晶	49		佐々木晶	寺田健太郎	横田勝一郎			
	15:00	増田 清司	佐々木 晶	49		佐々木晶	波多野恭弘	木村 淳			
	15:20	高橋 明寛	佐々木 晶	50		大高 理	佐々木晶	近藤 忠			
	休憩										
寺田	16:00	片本 尚吾	近藤 忠	50		近藤 忠	佐々木晶	西 真之			【近藤研】 宮川 恵輔
	16:20	加藤 拓人	近藤 忠	51		近藤 忠	西 真之	大高 理			
	16:40	神垣 遼	近藤 忠	51		近藤 忠	西 真之	佐野孝好			
	17:00	河野 克俊	近藤 忠	52		西 真之	近藤 忠	大高 理			

宇宙地球科学専攻(会場:D303)
2月14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
松本	9:00	舟見 優	波多野 恭弘	54	○	波多野恭弘	青山和司	新見康洋			【波多野研】 宮原 健輔
	9:20	東 佑貴	波多野 恭弘	54	○	波多野恭弘	湯川 諭	桂木洋光			
	9:40	島田 顕生	波多野 恭弘	55		湯川 諭	波多野恭弘	吉野 元			
	10:00	野口 遥佳	波多野 恭弘	55	○	波多野恭弘	湯川 諭	桂木洋光			
	10:20	MA Fang	波多野 恭弘	56		波多野恭弘	湯川 諭	佐々木 晶			
	休憩										
波多野	11:00	西田 海斗	長峯 健太郎	56		長峯健太郎	高棹真介	佐野孝好			【長峯研】 藤原 立貴
	11:20	山田 知也	長峯 健太郎	57		井上芳幸	長峯健太郎	小高裕和			
	11:40	柳澤 馨	長峯 健太郎	57		井上芳幸	長峯健太郎	住 貴宏			
	休憩										
長峯	13:00	花野 正浩	松本 浩典	58		坂和洋一	佐野孝好	高棹真介			【松本研】 宮本 愛子
	13:20	石渡 幸太	松本 浩典	58		小高裕和	松本浩典	上野一樹			
	13:40	鈴木 悠斗	松本 浩典	59		坂和洋一	松本浩典	野田博文			
	14:00	青柳 美緒	松本 浩典	59		松本浩典	野田博文	吉田 斉			

2月14日(水) 判定会議:H701, Zoom(ハイブリッド)
16:00-18:00 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13日（火）

一般化対称性を用いたカイラルゲージ理論の研究

山岡起也 素粒子論研究室(物理学専攻)

カイラルゲージ理論はフェルミオンのゲージ相互作用が右巻きと左巻きが非対称な理論である。カイラルゲージ理論は非摂動効果によりゲージ対称性自身が破れ得るなど豊かな構造を持ち、理論的にも標準模型をも超える模型構築の観点から興味深く重要である。しかし、IR 領域で強結合である場合には摂動計算ができないこと、さらに Nielsen–Ninomiya の定理から lattice シミュレーションによる、非摂動的な計算を行うことも現状困難であることから、カイラルゲージ理論の理解は、発展途上である。

近年その解決に向けて、新たに定義された一般化対称性が注目されている。その理解とカイラルゲージ理論への応用のために重要なのは、BF 理論と 't Hooft anomaly である。BF 理論を用いて新たな離散的対称性をゲージ化し、その 't Hooft アノマリーを調べることにより、カイラルゲージ理論について新たな情報を得ることができる。

本修士論文では、BF 理論とアノマリーの性質について説明した後に(1)Bars-Yankielowicz model、及び、(2)自己共役な表現に従うフェルミオンを持つ SU(6)model について、レビューする。(1)では、理論がもつ二つの 1-形式中心対称性を 't Hooft アノマリー整合条件に課すことにより、従来対称性だけでは区別の付かなかった 2つの IR 理論に明確な優劣を与える。(2)では、中心対称性とカイラル対称性の混合アノマリーの計算から、カイラル対称性が自発的に破れること及び、ゲージ不変なフェルミオンの 2 体凝縮が禁止されることを説明する。

さらに本論では、(2)において、原論文でゲージ化しなかった離散対称性を新たにゲージ化することによって、UV の 't Hooft アノマリーを全て求めた。この結果は原論文の後に出た Konishi らによる解析の結果と異なる。新たなアノマリーを二つの独立な解析の方法により、我々の結果に矛盾がないことを示した。さらに IR 理論の作用が、BF 理論とチャーン・サイモンズ項で構成されることを明らかにした。

サブシステム符号による共形場理論の構成

安藤 恵一 素粒子論研究室 (物理学専攻)

情報理論では誤り耐性を持つ計算機の実現のために誤り訂正符号と呼ばれる理論が発展を続けている。また、素粒子理論では弦理論の記述などに広く用いられている共形場理論(CFT)があり、両者の理論的動機は大きく異なるが、その数学的構造には深いつながりがある。特に、トラス上のコンパクトボソンを記述するカイラルな CFT が古典誤り訂正符号からユークリッド格子を介して構成できることが古くから知られおり、CFT の持つ対称性や物理量が誤り訂正符号の言葉を用いて解析することができる。

近年、量子誤り訂正符号と呼ばれる量子状態を通信の際に発生する量子ノイズから守るための理論からローレンツ格子を介して非カイラルな CFT を構成できることが発見された。量子誤り訂正符号の理論ではスタビライザー符号と呼ばれる広いクラスの量子誤り訂正符号の記述が可能な符号が古くから知られており、この非カイラルな CFT の構成もスタビライザー符号が用いられている。

一般に、量子誤り訂正符号は守りたい量子状態をより次元の大きい空間に冗長性を持たせて埋め込むことで誤り訂正を可能にする。この冗長性に加えて新たにゲージ自由度と呼ばれる冗長性を加えることで、より実用的な量子誤り訂正を可能とするサブシステム符号が現在の量子コンピュータの発展に伴い調べられている。

本研究ではこのサブシステム符号を用いて非カイラルな CFT の構成を行う。サブシステム符号はスタビライザー符号を内包しており、今までに調べられていたものよりもより広いクラスの CFT の構成が可能になる。また、グラフ理論を用いた符号および構成された CFT の分類についても議論する。

場の量子論におけるエンタングルメントとボソン/フェルミオン双対性

藤村 晴伸 素粒子論研究室 (物理学専攻)

量子エンタングルメントは量子論特有の相関であり、量子情報理論のみならず物理においても非常に重要な概念である。例えばエンタングルメントエントロピーを調べることによって臨界現象や物質相の情報を引き出すことができる。さらに、ブラックホールのエントロピーに類似した面積則が成り立つことから、エンタングルメントを調べることはホログラフィー原理の理解につながると期待されている。しかし、場の量子論においてエンタングルメントを厳密に計算することは自由場を除き非常に難しいのが現状である。そこで我々はこの問題を解決するためボソン/フェルミオン双対性に注目した。ボソン/フェルミオン双対性とはあるボソンの理論と別のあるフェルミオンの理論との間の双対性である。我々はこのアイデアを用い、相互作用を含むあるモデルに対してエンタングルメント Rényi エントロピーが厳密に計算できる例を示した。さらに結合定数が十分大きい場合、エンタングルメント Rényi エントロピーは減少することを示した。

COMET Phase- α で用いるレンジカウンタの研究開発

栗林 志恩 (物理学専攻)

COMET 実験は J-PARC にてミューオン電子転換過程を探索する。本実験に先駆けパイオン生成標的と輸送ソレノイドを用いたビーム試験(Phase- α)を実施し、COMET ビームラインのパイオン/ミューオン輸送性能の評価を行った。本研究では、当該ビーム試験で用いるミューオンビームの運動量スペクトルを測定するための検出器としてレンジカウンタの設計、製作、および性能評価を行った。レンジカウンタは多層型の検出器であり上流側からグラフィイト製のデグレーダ、粒子を検出し入射時刻を定める T0 カウンタ、負ミューオンを静止させるアブゾーバ、アブゾーバに静止した負ミューオンが崩壊して放出する電子を観測する T1、T2 カウンタからなる。デグレーダの厚みを調整することで特定の運動量を持つミューオンを選択的にアブゾーバに静止させ、アブゾーバとして銅を用いることにより銅中の負ミューオンが示す特徴的な崩壊時間分布の情報から負ミューオンの収量のみを評価できる。また、デグレーダの厚みを変更することでビーム中の負ミューオンの運動量スペクトルを測定することができる。T0 カウンタによるエネルギー損失を減らし低運動量の負ミューオンの測定を行うため 0.5 mm 厚の薄いプラスチックシンチレータを用いた大面積の特殊なカウンタを開発した。運動量分布の絶対値の算出には T0 カウンタの検出効率の評価をすることが重要である。この測定はミューオンビームを用いて行い、総合検出効率は 80%を超えることを確認した。これにより Phase- α で収集したデータから算出する負ミューオン運動量スペクトルの確度を向上させることに成功した。

高輝度 LHC ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器の X 線ヒット信号を用いた不良ピクセル判定の正確性

荒木田 陸斗 南條研究室 (物理学専攻)

2029 年から LHC の陽子ビーム輝度を上げる高輝度 LHC が始まる。これに向けて LHC ATLAS 実験では ATLAS 検出器最内層の内部飛跡検出器をアップグレードする。これに伴い、内部飛跡検出器に用いるシリコンピクセル検出器もアップグレードする。

アップグレードされたシリコンピクセル検出器を量産し、それらの性能を評価する試験を行う。この際、信号を読み出せないピクセル(不良ピクセル)を判別するため、X 線由来のヒットを数える試験がある。しかし、この試験においてヒット信号の数が少ないピクセルに対して、信号を読み出せるにも関わらず不良と判定する可能性がある。また、ノイズ等による偽のヒット信号が多いピクセルに対して、不良であっても信号読み出しに使えると判定する可能性もある。そこで、不良なピクセルを正確に判別するためにこの手法に必要な測定条件を調べた。またこの試験以外にも不良なピクセルを判別する試験が 2 つある。これらの試験による不良ピクセル判定の正確性を、X 線を用いた試験と比較することにより検証した。

J-PARC KOTO 実験のための検出器の光核反応による光子検出不感率 の測定方法

川田 悠統 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 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を探索している。この事象では終状態に 2 つの光子しか観測されない。この事象を探索するためには、背景事象を削減することが重要である。背景事象の多くは、電子や 3 つ以上の光子など、終状態に 2 つの光子以外の粒子が観測されるため、これらの粒子を漏れなく捉える必要がある。

現在 KOTO 実験では、背景事象を捉えるための検出器の一つである、鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器における光核反応による光子不感率が問題になっている。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊事象において、終状態の 4 つの光子のうち 2 つを検出し損なうと、信号事象と区別がつかないため背景事象となりえる。この背景事象について、シミュレーションによる評価を行ったが、シミュレーションのバージョンにより光核反応による光子不感率が異なるため、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 事象数の系統誤差が大きい。

本研究では、標識化光子ビームを用いた光核反応による光子不感率の実測を目指した。電子ビームを標的に当てた時の制動放射によって生じた光子ビームを用いる。制動放射後の電子の運動量の情報と光子のエネルギーを対応させることで、光子ビームを標識化する。

まず、光核反応による光子不感率の測定方法を設計した。ビームに当てる不感率測定の対象として、1 mm の鉛と 4.4 mm のプラスチックシンチレータが交互に 17 層重なった光子検出器を用意した。光子ビームをこの検出器に入射させ、光核反応により生じた中性子を、周囲を囲むようにして配置した液体シンチレータで検出する。中性子を検出したとき、光子検出器に落としたエネルギーが閾値以下の事象が光子不感事象である。

その後、標識化光子ビームを用いてビームテストを行った。今回のビームテストでは、光子不感率の実測に至らなかったが、ビームテストで取得したデータを用いて、設計を評価した。用いたビームの性質、光子検出器、中性子検出器、データ収集システムのそれぞれについて知見を得た。本発表では、光核反応による光子不感率の測定方法の設計と、ビームテストで得た知見について報告する。

大面積シリコンピクセル検出器を用いた ビームテスト用飛跡検出器の開発

久郷莉奈 南條研究室 (物理学専攻)

検出器の粒子入射位置に応じた性能を評価する際には、評価対象の検出器の上流や下流に飛跡再構成用の検出器を複数枚設置し、荷電粒子のビームを入射させる。荷電粒子がそれぞれの飛跡再構成用の検出器に入射した位置を測定し、入射粒子の飛跡を再構成する。再構成した飛跡を用い、評価対象の検出器の位置分解能や検出効率、検出器の応答の位置依存性などを調べることができる。本研究では飛跡再構成用の検出器として HL-LHC ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器を用いる。この検出器は大きさ 40 mm 角、ピクセルサイズ 50 μm 角のセンサーと、ピクセル単位でヒット情報を送り出す読み出し ASIC からなる。

このピクセル検出器を動作させるには、検出器を実装する基板が必要である。基板を通して ASIC やセンサーに電源を供給し、データを送り出すなどする。また、ピクセル単位のヒット情報を利用して信号を出すセルフトリガー信号があると、評価対象検出器に対して位置を限定し効率的にデータを取れる。しかし、ASIC にはセルフトリガー信号を読み出す機能があるものの、従来の基板にはなかった。そこで、本研究ではセルフトリガー信号を出す基板を設計し、作成した。さらに完成した基板に検出器と抵抗などの素子を実装し、動作確認試験を行った。動作には至らなかったが、設計と試験時に得た知見を報告する。

KOTO 実験のビームプラグを閉じて行なった 微弱相互作用粒子探索の背景事象の研究

柴田 哲平 南條研究室 (物理学専攻)

標準理論の粒子と微弱な相互作用をする未発見の微弱相互作用粒子は、暗黒物質など標準理論を超える物理に関連して提案されている[1]。微弱相互作用粒子は陽子ビームを標的に当てて作れる。また微弱相互作用粒子は、2つの光子に崩壊した場合、これらを検出することで観測できる。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。KOTO 実験では陽子ビームを金標的に当てて、2次粒子を作る。また、電磁カロリメータを用いて2つの光子を観測している。よって、微弱相互作用粒子の生成と観測ができる。

KOTO 実験では 20m のビームラインを通して、2次粒子を検出器に導く。このビームラインでは2次粒子を遮蔽するための16相互作用長のビームプラグがある。通常 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索ではこのビームプラグを開けてデータの取得をする。一方で、微弱相互作用粒子はビームプラグを通り抜けることができる。このため、ビームプラグを閉じてデータの取得をすると標準理論の粒子による背景事象を減らして微弱相互作用粒子の探索ができる。

本研究では KOTO 実験で微弱相互作用粒子を探索するために、ビームプラグを閉じて4時間取得したデータを用いて、背景事象の候補となる事象の収量を見積もった。

[1] Gaia Lanfranchi et al., Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 71:279-313 (2021).

Hydro Kinetic Theory を用いた輸送係数のくりこみ

氏名 北尾 紫洗 原子核理論研究室 (物理学専攻)

核子を構成するクォークやグルーオンの運動は量子色力学(QCD)を用いて記述される。QCDでは有限温度、有限密度領域においてさまざまな相をとり、「ハドロン相」、「クォークグルーオンプラズマ(QGP)相」、「カラー超伝導相」をとることが知られている。近年、このようなQCDの相構造に関する研究は理論、実験の双方からおこなわれており、相対論的重イオン衝突実験によってそれらをまとめたQCD相構造、とくに臨界点の探索が盛んにおこなわれている。

本研究では臨界点付近の輸送係数のくりこみを行う。先行研究ではQCD臨界点における系の対称性や universality class が気液相転移の臨界流体のモデルである model H と同じであるとわかっている。そのため、QCD臨界点付近の系に対して model H を適用し、臨界点付近における order parameter の長波長ゆらぎを含む Langevin 方程式を導出する。この方程式を基本として、QCD臨界点付近の輸送係数に対する揺らぎの寄与を時間依存する外場のもとで Hydro Kinetic Theory を用いて計算し動的臨界指数を求める。また、one-loop の寄与による補正の結果との比較を行う。

格子 QCD シミュレーションによる臨界温度付近における 2点空間相関の解析

平岩義寛 原子核理論研究室 (物理学専攻)

Quark-Gluon Plasma(QGP)は素粒子場の相転移を実験的に実現できる唯一の例であるという点から、とても興味深い状態である。2000年から始まった RHIC による実験や理論の発展から、相対論的重イオン衝突実験で生じる QGP は、強く相関しており液体状態だと示唆されている。また、温度が無限に高い極限では、QGP は Quantum Chromodynamics(QCD) の漸近自由性から気体状態になると考えられている。

強く相互作用しているため摂動展開が使えない領域の QGP において、その性質を定量的に確認するためには、格子 QCD 計算を行う必要がある。相関関数は格子 QCD 計算において直接計算することができ、QGP の状態の詳細を研究するのに役立つと考えられている。そこで、本研究では、Bridge++ という QCD を含む格子ゲージ理論のシミュレーションのためのコードセットを用いて、クォーク密度相関関数の計算を行った。計算結果に基づき、相関関数の距離に関する振る舞いを調査した。相関関数の計算過程で出てくる disconnected な部分を取り除くために、u クォークと d クォークの質量の差が小さいとし、アイソスピン対称性を課した。

Muon Spin Imaging Spectroscopy の開発

杉崎 堯人 川畑研究室 (物理学専攻)

μ SR(Muon Spin Rotation/Relaxation/Resonance)法は、スピン偏極ミュオンビームを利用して物質内の磁氣的性質を調べる実験手法である。スピン偏極ミュオンビームを試料に照射し、ミュオンの崩壊から放出される陽電子の非対称度を測定することで、試料内でのミュオンスピンの動きを観測して物質内の磁氣的性質を調べることができる。

μ SR 法は物質の性質を研究するのに有用な実験手法で、物質科学など様々な分野において利用されてきた。しかし、 μ SR 法に用いられる検出器は位置分解能を持たず、試料内部の物質の分布は特定することができない。そこで我々は、プラスチックシンチレーションファイバーを用いて位置分解能を持つ検出器を開発し、 μ SR 法を用いた新たなイメージング技術の開発に取り

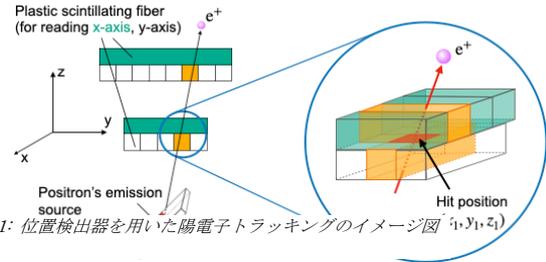


Figure 1: 位置検出器を用いた陽電子トラッキングのイメージ図 (x, y, z)

組んでいる。これまでに2度、カナダの TRIUMF 研究所で実証実験を行なった。Ag と SiO₂ を組み合わせた試料にミュオンビームを照射し、陽電子をトラッキングすることで試料内でのミュオンの停止位置を特定し、試料の各位置のミュオンスピン回転スペクトルを測定した。結果として、 μ SR 法を利用して試料の物質の分布を再構築することに成功した。

¹²Be アイソマー状態の断面積測定へ向けたアイソマー比と寿命の測定

田口 諒 川畑研究室 (物理学専攻)

原子核のアイソマー状態はその基底状態と大きく異なる構造を持つものがあり、原子核の性質を調べる上で重要である。中性子過剰核 ¹²Be には基底状態からエネルギーが約 2.3 MeV 高い所に半減期 230 ns のアイソマー状態が存在する。先行研究により、このアイソマー状態では基底状態と比較して核半径が大きくなっている可能性が考えられているが、まだ決定的な証拠は得られていない。そこで、我々は反応断面積を測定することでその核半径を直接的に求めたいと考えており、そのためにはビームに含まれるアイソマーの割合(アイソマー比)についての情報が必要である。

本研究では1次ビームとして 250 MeV/u の ¹³C, ¹⁸O ビームを用い、¹²Be ビームを生成してそのアイソマー比を測定した。また、アイソマー状態の寿命を精度良く決定した。本発表ではこれらの測定結果を報告し、議論する。

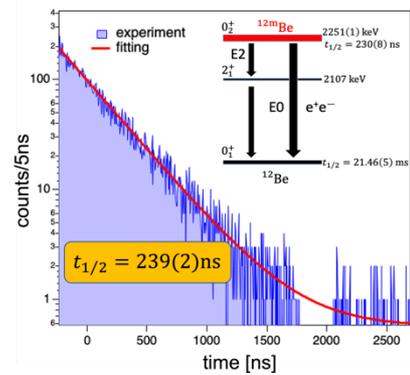


図1: ¹²Beの準位図とアイソマーの脱励起による γ 線の時間スペクトル

Yb ファイバーレーザーによる短パルスレーザーイオン源開発 橘高正樹 加速器研究部門 (物理学専攻)

近年、炭素や陽子ビームを用いた粒子線がん治療法において、通常よりも著しく高い線量率で短時間照射することで、高い治療効果を維持したまま正常組織への障害を抑えることができる FLASH 照射が注目されている。FLASH 照射は実験的な効果は実証されているが、細胞レベルで見た場合のエネルギー付与率や時間構造の治療効果への影響など FLASH 照射のメカニズムについては未解明な問題も多くある。そのため、FLASH 照射研究に必要な比較的高強度で 40Gy/sec 以上の高線量率で照射が可能な短パルス陽子ビームの実現が求められている。

そこで本研究は、超短パルスレーザーイオン源を利用して AVF サイクロトロン(AVF)に入射する陽子ビームのパルス化を行うことで、ピーク電流値の高い短パルス陽子ビームの生成を目指す。目標とするビーム諸元はパルス周波数が数 kHz で平均電流が $1\mu\text{A}$ 以上である。開発した短パルスレーザーイオン源は Yb ファイバーモード同期レーザー、音響光学変調器(AOM)、ファイバーアンプ、そしてイオン生成チェンバーで構成される。モード同期レーザーはパルス周波数 40MHz、パルス幅数百 fs で発振している。これを下流に設置している AOM により数 kHz でパルスを切り出し、さらに下流にファイバーアンプを設置することで、切り出したレーザーパルスの強度を増強する。これをイオン生成チェンバー内で集光してイオンを生成する。今回レーザーの標的に高電圧印加したチタンを用い、チタンに吸着した水素イオンを取り出す。また、生成したイオンを RCNP の AVF で加速するため、AVF の加速周期と同期したタイミングでイオン生成を行う必要がある。そのためレーザーの 40MHz と AVF の加速周波数 18~36MHz の信号が同期するタイミングの信号を AND 回路で抽出する。そこからさらに、数 kHz で間引いた信号を、AOM に入力することで、AVF に同期したイオン生成を行えるように工夫した。本発表では、短パルスレーザーイオン源のイオン生成と AVF の加速周波数とのタイミング信号を生成する回路の設計開発及びその性能評価について報告する。

物理学専攻
素粒子・原子核グループ
会場：H701
2月14日（水）

CANDLES 実験における $0\nu\beta\beta$ 観測のための

^{212}Bi バックグラウンドの低減

白井 竜太 川畑研究室 (物理学専攻)

ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$ 崩壊)はニュートリノと反ニュートリノに同一性(Majorana 性)がある際にのみ起こる事象である。この事象は、ニュートリノ質量の決定や、物質優勢宇宙の解明につながる極めて重要な事象であるが、未だ発見には至っていない。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験では、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊のQ値付近の背景事象を低減することが求められる。CANDLES 実験では高いQ値(4.27 MeV)を有する ^{48}Ca が含まれる CaF_2 結晶を 96 個使用して $0\nu\beta\beta$ 崩壊を探索しているが、結晶内に含まれる ^{232}Th 由来のバックグラウンド (BG)が問題となっている。主要BGの一つとして、 ^{212}Bi の β 崩壊に続けて半減期 299ns で α 崩壊を起こし、2つの波形が重なることで観測される Pile-up 波形(Double Pulse :DP)がある。この事象は従来のフィッティングによる二重ベータ崩壊の波形(Single Pulse :SP)との識別が難しく、 $0\nu\beta\beta$ に対する感度が低下してしまう。

本研究では、機械学習を用いてPile-upの際のDP除去効率を評価した。また、機械学習を行うにあたって事前にデータカットが行われているため、モンテカルロシミュレーション(MC)によりカット前のデータ分布の再現を行った。

本発表では、機械学習を用いたSPとDPの波形識別とMCにより再現された分布からDP除去効率の評価及び、推定されるBG残存量について議論を行う。

J-PARC $\pi 20$ ビームラインで用いる

TOF-tracker Multi-gap Resistive Plate Chamber の開発

宇田隆佑 原子核実験研究室 (物理学専攻)

我々は J-PARC ハドロン実験施設で建設予定の高運動量二次粒子ビームラインである $\pi 20$ ビームラインにおいて陽子の内部構造を探る実験を計画している。この実験では陽子の内部構造を 3 次元的に記述する一般化パートン分布関数を決定するために排他的ドレルヤン反応 ($\pi^-p \rightarrow \gamma^*n \rightarrow \mu^+\mu^-n$) の反応断面積の測定を行う。 μ 粒子の粒子識別を行うために、我々は高時間・高位置分解能を併せ持つ Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC) という検出器の開発を行なっている。位置及び時間分解能の両方が優れていることで π 中間子やK中間子の崩壊で生じる μ 粒子によるランダム・コンビナトリアル・バックグラウンドを抑制できる。

MRPCとは、高抵抗のガラスを数100 μm の間隔ごとに複数枚積層したガス検出器である。MRPC は磁場中で使用可能で安価で製作可能であるとともに、約50 ps程度の高い時間分解能を持つという利点がある。従来のMRPCと違い、読み出しストリップのピッチを数mm程度と狭くし、上下のストリップの向きを直交させることで高い時間分解能に加え、高い位置分解能も持つ TOF-tracker MRPC の開発を行っている。

今回、有感領域 $500 \times 1000 \text{ mm}^2$ 、ストリップピッチ5 mmの TOF-tracker MRPC のプロトタイプを製作した。ビーム試験においてこのプロトタイプ MRPC の検出効率、時間分解能及び位置分解能の評価を行った。本講演では得られた性能評価試験の結果について報告する。

J-PARC におけるチャームバリオン分光実験で用いる 飛行時間測定用大型 Multigap Resistive Plate Chamber の開発

林 双葉 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て、チャームバリオン分光実験を計画している。この実験では $20 \text{ GeV}/c$ の π^- ビームを LH_2 標的に照射し、 $\pi^- + p \rightarrow D^{*-} + Y_c^{*+}$ の反応でチャームバリオン (Y_c^{*+}) を生成する。 D^{*-} の崩壊による π^-, K^+ とビーム π^- の運動量を測定し、質量欠損法を用いて Y_c^{*+} の質量スペクトルを得る。崩壊粒子のうち、 $1.7 \text{ GeV}/c$ 以下の π^-, K^+ の粒子識別に Multigap Resistive Plate Chamber (MRPC) を使用する。MRPC を用いて粒子の飛行時間を測定し、飛跡検出器により得られる運動量情報と合わせて粒子識別を行う。この MRPC は読み出しストリップの長さ方向が 1.8 m で、 60 ps 以下の時間分解能を持つことが要求される。また、本実験ではトリガーレス連続読み出し DAQ システムを導入し時間情報のみを取得する。そのため電荷の情報は用いず、時間情報のみを用いた解析が求められる。

MRPC とは高抵抗のガラス板を重ねたガス検出器であり、本研究では 1.8 m 長の MRPC を製作した。検出効率や時間分解能を評価するため、SPring-8 LEPS2 ビームラインにて電子ビームを用いたテスト実験を行った。また、J-PARC ハドロン実験施設内の K1.8BR ビームラインにおいてハドロンビームを用いたテスト実験を実施した。J-PARC でのテスト実験では初めてトリガーレス連続読み出し DAQ システムを用いてデータを取得し、測定した飛行時間による粒子識別を行った。本発表では得られた性能を報告する。

重陽子非弾性散乱を用いた ^{12}C の稀ガンマ崩壊モード探索実験のための 標的開発

本多祐也 原子核実験研究室 (物理学専攻)

^4He から ^{12}C を生成するトリプルアルファ (3α) 反応は宇宙における元素合成過程において極めて重要な反応のひとつであり、その反応率は中間状態である 3α 共鳴状態の γ 崩壊確率に強く依存する。 10^9 K 以上の高温環境下では、 3_1^- (9.64 MeV) や 2_2^+ (9.87 MeV) 状態などの高励起 3α 共鳴状態の寄与が重要になると指摘されているが、期待される γ 崩壊確率は非常に小さく、未だ測定されていないものが多い。そのため、高温環境下での 3α 反応率には大きな不定性が残されている。

我々は、過去に陽子非弾性散乱を用いて 3_1^- 状態の γ 崩壊確率を測定したが、バックグラウンドによる系統誤差が大きく十分な精度を得られなかった。その原因としては、標的中の不純物による陽子ロックアウト反応が考えられる。そこで、我々は標的を水素から重水素に変更し、 3_1^- 状態の γ 崩壊確率を再測定することを計画している。重陽子標的の候補として、融解せず取り扱いやすい重水素吸蔵チタン (TiD_2) と S/N 比の良い固体重水素の 2 つを検討した。 TiD_2 は重イオンビームの照射実績がなかったため、東北大学 CYRIC にて性能評価実験を行った。また、固体重水素は、作成試験及び熱伝導方程式を用いた熱負荷の計算を行った。そして、これらの結果から本測定で使用する標的を決定し、実験の実現可能性を議論した。

自己遮蔽型スケルトンサイクロトロン 松井昇大朗 核物理研究センター加速器研究部門 (物理学専攻)

医療分野において加速器応用が進み、様々な放射線診断・治療技術が開発されている。しかし、大半の医療用サイクロトロンは、磁気ヒステリシスで変化する磁場の制御が複雑なため、加速イオン種とエネルギーに応じて、サイクロトロンの設計仕様は変わってくる。そこで、様々な放射線同位体(RI)を製造し、PET 検査用 RI のみならず、アルファ線核医学治療用 ^{211}At 製造やホウ素中性子捕捉療法(BNCT)も行えるように、スケルトンサイクロトロン(SC)が提案された。SC は、複数の空芯コイルのみ組み合わせ、ヒステリシスによる影響を受けることなく、様々な加速磁場を形成する新型サイクロトロンである。先行研究では、引き出し半径 40 cm の完全空芯型 SC の実現可能性が示されたが、超コンパクトであるが故に、ビームの取り出しが容易ではなく、ビーム引出機器とのビームロスによって発生する中性子の遮蔽が大きな問題であった。そこで、本研究では、引き出し半径を 50cm に大きくした自己遮蔽型 SC の設計研究を行っている。この自己遮蔽型 SC は、既に病院内に設置されている PET 用サイクロトロンと置換できるように、放射線遮蔽と磁気遮蔽を兼ねたリターンヨークを設計した。その結果、サイクロトロン中心から 5m の位置において、ペースメーカーに影響を及ぼさない磁束密度 5Gauss の漏れ磁場を抑えられることも確認した。また、リターンヨークと PET、鉛、PE、コンクリートを併用することで、部屋のコンクリート壁の厚さ 50cm とすることにより、重陽子 100 uA のビームロスがあっても、管理区域内で法令線量限度 1mSv/week を超えないことを確認した。加速磁場形成では、非円形であるセクターコイルの設計において、鉛直方向のビーム集束力を得るためのフラッター形成と、等時性磁場形成を両立させるために、従来は時間をかけて磁場計算を繰り返して最適化していたが、ベイズ最適化を用いて 1 日以内で、セクターコイルの設計ができるように、設計に要する時間を大幅に短縮した。さらに、単粒子軌道計算で加速磁場の最適化を行った後、空間電荷効果を含んだ多粒子軌道計算を行いビームの挙動解析を行った。

チャームバリオン分光実験のための ASAGI ver 1.5 性能評価

宮本憲伸 野海研究室 (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(E50)を計画している。実験では、20GeV/c の π^- ビームを液体水素標的に入射させ、 $\pi^- + p \rightarrow D^{*-} + Y_c^{*+}$ 反応でチャームバリオンを生成する。 D^{*-} はさらに $D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0 \pi^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-$ と崩壊する。 K^+ や π^- の運動量を測定することで D^{*-} の 4 元運動量を求めることでミッシングマス法よりチャームバリオンの質量スペクトルを測定する。この $K^+ \pi^-$ の飛跡検出器にドリフトチェンバーを使用する。そのドリフトチェンバー読み出し回路として、ガス検出器汎用 ASIC(AGASA)を使用した ASAGI ASD カードを開発している。ASAGI ASD カードは検出器からの電荷量や波形の整形時間をパラメータを設定することで、使用するドリフトチェンバーやガスに合わせた調整を行うことができるのが強みである。我々は初期版から ASIC の個数や光通信によるパラメータ設定が可能になるよう変更を行った ASAGI ASD カード Version 1.5 の性能評価を行った。J-PARC E50 実験で実際に使用するドリフトチェンバーに繋ぎ、 β 線源や宇宙線を用いた試験を行って ASAGI カードの性能を評価した。本発表では、これら性能評価の結果について報告する。

レーザー航跡場加速器用超音速ガスジェット標的評価のための 高時間空間分解計測システムの開発

佐藤新悟 細貝研究室 (物理学専攻)

我々は km にも及ぶ巨大な X 線自由電子レーザーをレーザー航跡場加速による電子ビームを用い装置全体を数メートルのサイズに縮小させることを最終的な目標とし、現在は XUV 領域での自由電子レーザーの発振を目指した研究開発を実施している。超音速ガス標的中に衝撃波を作りレーザー航跡場へ電子バンチを入射し加速する衝撃波入射法方式で生成可能な電子ビームの電荷量、エネルギー、エネルギー広がり、パルス幅等の各パラメーターは EUV~X 線領域での自由電子レーザーの発振を充分期待できるが、これら全てのパラメーターを同時に再現性よく達成することが喫緊の課題である。衝撃波入射法では衝撃波位置とレーザーの焦点位置の相対位置が電子ビームのパラメーターに非常に敏感であるため、数 μm 程度の衝撃波位置の制御が必要で、それを高い時間空間分解能で計測するためのシステムの構築が必要である。

本研究ではチタンサファイアレーザーの 2 倍高調波を用いた時間分解能 $\sim 30\text{fs}$ 空間分解能 $\sim 1\mu\text{m}$ の高時間空間分解シュリーレン計測系を構築し、超音速ガス標的中の衝撃波と電子ビームパラメーターおよびそれらの相関の評価を行った。さらに、本研究によって開発した計測システムが現状の電子ビームと超音速ガス標的の安定性評価に十分な時間空間分解能を持つことも示した。

高コントラストレーザーと金コーンの相互作用による 低発散電子ビームの加速

築道拓実 藤岡研究室 (物理学専攻)

高速点火レーザー核融合は、高強度のレーザーと物質・プラズマの相互作用によって電子を加速し、これらの電子ビームを利用して高密度の核融合燃料を加熱する手法である。本研究の目的は、高速点火レーザー核融合に適した高速電子ビームを生成するためのレーザー条件と物質・プラズマ形状を明らかにすることである。加熱効率を決定する重要な物理量であるレーザー加速電子ビームの発散角は、電子ビームの伝播領域からの特性 X 線をイメージングすることで計測することができる。この特性 X 線は、電子ビームとの衝突で内殻電離した原子が放射するものである。

大出力レーザー装置では、レーザーを増幅する過程で、メインパルス以外にプレパルス、フットパルス、ペDESTALといった光のノイズやバックグラウンドが生じる。メインパルスとノイズ及びバックグラウンドの強度比をコントラストと呼び、このコントラストはレーザーと物質の相互作用に大きな影響を与えることが知られている。本研究ではプラズマミラーと呼ばれる素子を用いて、高強度レーザーを高コントラスト化した後にコーン形状の金に照射した。加速された電子ビームは銅を含むトレーサー層に入射し、発生した Cu-K α 線は球面湾曲させた水晶結晶でイメージングプレート上に結像した。低コントラストかつ平板形状の物質との相互作用で加速された電子ビームと比較して、高コントラストかつコーン形状の物質との相互作用で加速された電子ビームは、狭い空間広がりを持つことが確認された。

Theoretical studies on the mass origin of neutrino and dark matter by the spontaneous symmetry breaking of an extra gauge symmetry

Guohao Ying 兼村研究室 (物理学専攻)

With the discovery of the Higgs boson at the Large Hadron Collider (LHC) at CERN in 2012, all the fundamental particles in the Standard Model of particle physics (SM) have been tested and verified by experiments. However, there are some physics phenomena that the SM cannot explain: (1) The origin and smallness of active neutrino masses; (2) The nature of dark matter; (3) Baryogenesis. Therefore, it's necessary for us to consider new physics beyond the SM. In this research, we consider a model which can explain the tiny mass of active neutrinos and dark matter abundance. This model extends the SM with a $U(1)_{B-L}$ gauge symmetry and an unbroken Z_2 symmetry. The dark matter in this model receives its mass through the spontaneous symmetry breaking of the $U(1)_{B-L}$ gauge symmetry. The mass of active neutrinos is radiatively generated. We present a new viable benchmark scenario under the current experimental data for the model. We also give phenomenological discussions for this benchmark scenario.

ニュートリノ質量、ダークマター、バリオン数非対称性を説明する TeV スケールの物理模型と CP の破れに関する理論的研究

氏名：谷口 宙 素粒子論 1(兼村)研究室 (物理学専攻)

素粒子の標準模型は高エネルギー実験のデータをうまく説明できる理論模型である。その一方、ニュートリノ振動、ダークマター、バリオン数非対称性(BAU)など、標準模型では説明できない現象が知られている。これらの現象を説明することは現代の素粒子物理学の最重要課題であり、様々な研究がなされてきた。2009年にこれら3つの現象を同時に説明し得る理論模型として、青木-兼村-瀬戸(AKS)模型が考案された。この模型に現れる新粒子は全て TeV スケールにあるため、本模型は実験での検証が期待できる魅力的な模型である。しかしオリジナルの論文ではニュートリノ振動とダークマターに加えて BAU の説明に必要な一次相転移に関する解析がなされた一方で、簡単のために CP の破れは無視され生成バリオン数は計算されなかった。2022年には青木、榎本、兼村が元の AKS 模型を特殊な湯川相互作用を持つように拡張し、CP の破れも考慮することにより BAU を含む3つの現象を同時に説明することに成功した。しかし拡張によってパラメータが多くなり、かつ Flavor Changing Neutral Current(FCNC)を ad hoc な仮定によって抑制するなどの問題点もあった。本修士論文では、よりシンプルで FCNC を自然に抑制する機構を備えているオリジナルの AKS 模型で CP の破れを考慮した解析を新たに実施し、電気双極子モーメント、ニュートリノ振動、レプトンフレーバーの破れの実験からの制限などを全て満たすことができることを示した。

複合粒子描像に基づく TeV スケール暗黒物質模型の検証

山中 拓夢 素粒子論研究室 (物理学専攻)

Planck 実験に代表される数多くの宇宙観測の結果から、暗黒物質と呼ばれる正体不明の物質が存在することが知られている。近年、暗黒物質の間接観測実験では $O(10 - 100)$ TeV の質量を持つ暗黒物質に対する感度が向上しており、その観測が期待されている。このような暗黒物質を記述する模型として、新たに $SU(N)_d$ ゲージ対称性を導入し、その基本表現であるフェルミオン (dark quark) からなる複合粒子を暗黒物質の候補とする複合粒子暗黒物質模型が議論されている。dark quark からなる中間子様粒子 (dark pion) は G-パリティと呼ばれる対称性によって安定性が担保されており、暗黒物質の候補となる。dark quark が零質量の極限において、この dark pion は主に標準模型のゲージ粒子へと対消滅し、観測されている暗黒物質のエネルギー密度を記述する dark pion の質量は 2.5 TeV 程度と決まる。

本研究では dark quark の質量を非零の値に取った場合に注目し、暗黒物質の残存量を記述するパラメータの探索を行った。dark quark の質量は dark pion の質量スペクトルに影響を及ぼし、dark pion がより重い複合粒子へと対消滅するチャンネルが残存量に寄与しうる。この寄与により、 $O(10)$ TeV の質量を持つ dark pion も暗黒物質の候補となることを明らかにした。このような dark pion は間接観測実験での観測が期待される。また、dark quark の質量位相によって導入される CP 対称性の破れについても議論する。

物理学専攻
物性グループ
会場：D403
2月13日(火)

スピン軌道相互作用無秩序系における コヒーレント波輸送とスピン緩和の時間発展

梶 昌孝 黒木研究室 (物理学専攻)

相互作用や次元性が高度に制御可能な冷却原子気体は、量子多体系や非平衡現象を研究するための理想的なプラットフォームとなっている。無秩序系における量子干渉の研究においては、粒子密度の時間発展を実空間・運動量空間で直接観測できる点が特に強力であり、時間の自由度を考慮した新奇物性の探索が試みられている。

本研究ではスピン軌道相互作用(SOC)のある二次元系における物質波輸送の時間発展を数値的・解析的に調査した。SOCは建設的な干渉を破壊的な干渉に反転させるため、運動量空間の粒子密度分布に非自明な時間発展が現れた。さらに、SOCが弱い領域と強い領域で密度分布の時間発展が全く異なる振舞いをみせることが明らかとなった。解析計算では無秩序を摂動的に扱う一方、SOCを非摂動的に扱うことで、それぞれの領域に対応する時間スケールを特定し、SOCが弱い領域から強い領域へのクロスオーバーを正確に説明することができた。この結果は冷却原子で実現する合成SOCにより再現できると期待される。

平坦バンドを持つ二次元格子上的 Hubbard 模型における 超伝導に関する研究

相田 哲明 黒木研究室 (物理学専攻)

高温超伝導に対して理論的アプローチを行う文献[1,2]では、unit cell 内に複数のバンドが存在し、あるバンド幅が広く、かつ他のバンド幅が狭い wide & narrow band 共存系において、narrow band の直上/直下にフェルミエネルギーがあるとき、超伝導に有利になる傾向を指摘している。また文献[3,4]では、2本鎖梯子型格子や正方格子 bilayer など、実空間上で Cooper pairs を組むサイトが直観的に明確である様々な格子上的 Hubbard 模型において、超伝導増強の可能性を議論している。

本研究では、平坦バンドを有するカゴメ格子とリープ格子に焦点を当てた。これらの系は実空間上で Cooper pairs を組むサイトが直観的に明確でないが、文献[3,4]と同様に平坦バンドの直上/直下にフェルミエネルギーがあるとき、超伝導を増強することがわかった。また、超伝導を増強させるためには、narrow band と wide band のバンド間で起きる対散乱が重要であることを示した。

[1] K. Kuroki, T. Higashida, and R. Arita, Phys. Rev. B **72**, 212509 (2005).

[2] K. Kobayashi *et al.*, Phys. Rev. B **94**, 214501 (2016).

[3] K. Matsumoto *et al.*, Phys. Rev. B **97**, 014516 (2018).

[4] K. Matsumoto *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 044709 (2020).

Pr₂Ba₄Cu₇O_{15-δ}の鉄橋型格子における スピン揺らぎ媒介超伝導に関する研究

八木 俊輝 黒木研究室 (物理学専攻)

銅酸化物の非従来型超伝導には、CuO₂面が超伝導を示すものが多く存在する。ところが、銅酸化物超伝導体Pr₂Ba₄Cu₇O_{15-δ} (Pr247)ではCuO₂面が反強磁性絶縁体となることが実験的に示され、代わりに一次元の二重鎖構造、いわゆる「鉄橋型格子」が超伝導になっていると提起されている。これは銅酸化物超伝導体として大きな特徴であり、CuO₂面によって超伝導となる物質とは全く異なった超伝導の仕組みが期待される。これまでも鉄橋型格子に関する超伝導の研究は行われており、理論的にも様々な解析がなされている。しかし、超伝導に有利とされるフェルミ準位がバンド端近傍にある「incipient band」の状況が及ぼす影響について、鉄橋型格子に当てはめて研究したものはあまりない。鉄橋型格子ではその特異な電子ホッピングの関係によってincipient bandが形成されることが予想されるため、それによって超伝導が発現している可能性も考えられる。

そこで、本研究ではPr247について鉄橋型格子のHubbard模型を考え、揺らぎ交換(FLEX)近似、線形化Eliashberg方程式を用いて超伝導を解析する。その際に、超伝導に有利とされるincipient bandとそれを形成する特異なホッピングの観点から考察する。

二次元多谷半導体における励起子複合体の 拡散モンテカルロ法による研究

大江 海静 浅野研究室 (物理学専攻)

通常の半導体では、励起子分子や荷電励起子までの励起子複合体が形成される。一方、バンドに多谷構造を持つ多谷半導体では、電子や正孔がスピン自由度に加えて谷自由度を持つため、パウリ排他律が緩和し、励起子3量体や荷電励起子分子以上の励起子複合体が形成され得る。

二次元系では面直方向への閉じ込めによって励起子の束縛エネルギーが上昇する。このことは励起子複合体の形成にも有利に働くと考えられるため、二重二層グラフェンのtype-IIヘテロ構造を念頭に置いて、空間的に離れた二つの二次元面に閉じ込められた電子と正孔が、ともにスピン自由度2と谷自由度2に由来する内部自由度4を持つ系で励起子複合体を考察した。具体的には、拡散モンテカルロ法を用いて、励起子 n 量体 X_n ($1 \leq n \leq 4$) と荷電励起子 n 量体 X_n^- ($1 \leq n \leq 3$)の基底エネルギーを数値的に厳密に評価した。その結果、 X_n の解離エネルギー S_n (X_n から励起子1個を分離する際に必要なエネルギー)が $n-1$ に比例すること ($S_n \approx U(n-1)$)、 X_n の電子親和力 A_n (X_n に電子を1個付け加えた際の利得エネルギー)が n に比例すること ($A_n \approx n\Delta$)、 X_n^- の解離エネルギー S_n^- (X_n^- から励起子1個を分離する際に必要なエネルギー)と n の間にも線形な関係があることを見出した ($S_n^- \approx U(n-1) + \Delta$)。これらの結果は励起子同士の間にも共通な結合 U が生じること、余剰電子と各励起子の間に共通な電子親和力 Δ が生じることを意味している。

電子正孔系の一粒子スペクトル・光学応答・Cooper 不安定性に対する T 行列近似理論

兵頭周 浅野研究室 (物理学専攻)

光励起された半導体で実現する電子正孔系は、電子正孔間引力に起因する多彩な物性を示す。本研究では、遮蔽された HF 近似と T 行列近似を用いて三次元電子正孔系の正常相を解析し、以下の結果を得た。

まず、励起子のイオン化率を指標に励起子 Mott クロスオーバーを調べ、高温では密度を上げるとイオン化率が漸進的に増加するのに対し、低温では特定の密度の近傍で急激に増加することが分かった。また、電子正孔対凝縮に関しては、対感受率の発散 (Cooper 不安定性) により対凝縮転移温度を決めて、その BEC-BCS クロスオーバーを再現できた。

吸収利得スペクトルを調べると、低密度では励起子由来のピークが現れ、密度増加に伴いそれは抑えられ、電子正孔ポテンシャルより低エネルギー側に光学利得を生じる。温度を下げると、高密度側のスペクトル形状が顕著に変化し、対凝縮転移温度に近づくとき電子正孔化学ポテンシャル近傍のスペクトルが分散型の形状へ変化する。電子の一粒子スペクトルは、低密度側で準電子バンドのほかに励起子由来のサテライト構造を示し、高密度側へ近づくときそれがぼやけて準電子バンドの線幅になる。ここで対凝縮転移近傍まで温度を下げると、低密度側で励起子由来のサテライト構造が準正孔バンドを逆さまにコピーした形状となり、密度を上げるとこのコピーのエネルギー位置が上昇して準電子バンドと交差する。このとき、BEC-BCS クロスオーバー (中間密度) 領域では、対凝縮に至っていなくても交差点で擬ギャップが開く。

3次元特異フラットバンドにおける磁場効果

五十嵐 勇治 越野研究室(物理学専攻)

パイロクロア格子は近似的に3次元全ての方向に分散の無い平坦バンドを持つことが知られる[1]。これはカゴメ格子で知られる特異平坦バンド[2]の3次元版であり、非自明なトポロジーのために、除去できない特異点を持つことが特徴である。この研究では、3次元平坦バンド模型に対して磁場中のランダウ準位を計算し、バンドトポロジーとの関係を調べた。

3次元平坦バンド模型では、分散の無い2枚の縮退した平坦バンドと、二次分散をもつバンドが存在し、両者は波数0で接する。磁場中では、平坦バンドに由来するランダウ準位がトポロジカルな特異性によりエネルギー分散を持ち、かつ最低ランダウ準位が平坦バンドと二次分散バンドとの間を橋渡しする特徴的な構造を示す。これらの性質は、3次元平坦バンド模型に実効的な質量項を付加したワイル半金属模型とそのトポロジーから理解できる。この特異なランダウ準位の振る舞いにより常磁性を示す事、さらにバンドを橋渡しする特殊な最低ランダウ準位が、磁気振動の異常な位相として検出しうることを示す。

[1] Guo and Franz PRL **103**, 206805 (2009) [2] Rhim, et al., Nature **584**, 59 (2020)

1 次元系における非断熱モアレポンプの理論

河岡 巧真 越野研究室 (物理学専攻)

グラフェンのような二次元物質を回転させて重ねると、物質の格子間隔よりも遥かに大きな周期を持つモアレ模様と呼ばれる長周期構造が現れる。一方の層を他方の層に対して相対的にスライドさせると、モアレ模様がそれよりも遥かに大きな速度で移動し、それに追従して電子が輸送される[1]。これは「モアレポンプ」と呼ばれる。先行研究では、無限小のスライド速度の極限で正しい断熱近似が用いられてきたが、実際にはモアレ周期が大きくなるほどモアレの移動速度も無限に速くなることのできるため、断熱近似が破綻する速度領域が必ず存在する。

この研究では、モアレポンプにおける非断熱効果を調べるために、Floquet 理論および Keldysh グリーン関数法を用いて、単純な一次元二重鎖モアレ模型における電荷ポンプを調べた。この模型は周期の異なる 2 つの tight-binding 鎖からなり、格子間隔の違いが作るモアレパターン上に電子が束縛される。このとき、一方の鎖を大きな振動数で交流的にスライドさせると、振動数が十分に小さいときは、電子はモアレパターンに追従する断熱的振る舞いをみせるが、振動数が大きくなるにつれ、断熱近似は急速に破綻し、不規則な応答を示すようにある。さらに振動数の大きい極限では、各格子点上の波動関数は時間にほとんど変化せず、モアレパターンの変化を完全に無視することを明らかにした。

[1] M. Fujimoto, et al, Phys. Rev. B **101**, 041112(R) (2020)

Optical Phonons in Moiré Pattern

Yufei Liu 越野研究室 (物理学専攻)

The study of the materials with moiré patterns is of great interest in condensed matter physics. In twisted bilayer graphene, for instance, the electronic band structure is strongly modified by the moiré pattern, leading to flat bands and associated unusual phenomena including superconductivity. It is also shown that the phonon spectrum is affected by the moiré superlattice. Previous theoretical study showed that the long-wavelength acoustic phonon mode is reconstructed into the collective vibration of moiré lattice, which is called moiré phonons. On the other hand, the moiré effect on short-wavelength phonons such as optical modes remains mostly unclear.

In this work, we perform a theoretical calculation of one- and two-dimensional moiré systems, and studied the superlattice effect on the optical phonons. We consider a system composed of a pair of lattices (1D chain / 2D square lattice), and use the Born-Von Karman model (the spring model following Hooke's law) in the intralayer atomic interaction and the Gaussian function potential model in the interlayer atomic interaction. We find that the highest optical phonon branch is reconstructed into a flat band, which corresponds to characteristic phonon modes confined in the moiré domain.

深層学習における長時間ダイナミクス

織戸悠輔 菊池研究室(物理学専攻)

近年、大量のデータと計算機能力の向上により、深層学習の発展は目覚ましく、自然言語や画像など様々な分野で幅広く応用されている。しかしその一方で、深層学習は大量のパラメータや複雑な非線形性を持つことから、学習が何故うまくいくのか、また予測の判断根拠などについての多くは合理的に理解されていない。そこで、本研究ではこの深層学習のブラックボックス問題を情報統計力学的に考察し解明する事を目的とし、深層ニューラルネットワークを用いた教師あり学習のシミュレーション(SGD)を行い、長時間のダイナミクスを解析した。具体的には、同じ画像データで学習する複数のマシン(レプリカ)を作成し、これらのマシンが学習の過程においてどのような類似性をもつのかを測定した。解析の結果、時間的な性質としては、学習における損失関数の値が定常化した後にも、マシン同士の相関は緩やかに変化し続けることがわかった。また空間的な性質として、十分な時間が経過した後は、ネットワークの外側の層ほど類似度が高く、内側の層になるほど類似度が下がるという学習の空間的不均一性を見出した。

格子タンパク質模型のファネル型エネルギーランドスケープと進化

丸山 恭史 菊池研究室(物理学専攻)

折りたたむタンパク質のエネルギーランドスケープはファネル状(漏斗状)の形になっている。本発表ではファネル状のエネルギーランドスケープの起源について、進化の観点から検討する。

でたらめなアミノ酸配列では折りたたむことはできないため、生命はファネル状のエネルギーランドスケープを持つアミノ酸配列を長い進化の過程で獲得してきた。進化では何らかの機能を持ち生命にとって役に立つタンパク質が選ばれるため、第一の選択圧は機能である。したがって機能を高めるために活性部位の構造が安定化されるのにしたがって、タンパク質全体の構造が安定化したというシナリオが考えられる。

我々は格子タンパク質模型に特徴的な構造が現れたとき、それを活性部位とみなすモデルを構築した。このモデルでは活性部位の形を定め、機能 ψ を活性部位がある配位で $\psi = 1$ 、無い配位で $\psi = 0$ と定義する。さらに機能 ψ の熱平衡値を適応度 f と定義する。マルチカノニカルモンテカルロ法で適応度の全範囲にわたってアミノ酸配列をランダムサンプリングした。この結果、高適応度のアミノ酸配列はファネル状のエネルギーランドスケープを持ち、二状態転移となることがわかった。加えて高適応度のアミノ酸配列が進化で出現することも、進化シミュレーションから明らかになった。以上の結果は、機能を高めるように進化すれば、ファネル状のエネルギーランドスケープを持つタンパク質が出現することを意味している。

YbCu₂/Cu(111)単原子層合金における重い電子状態

杉原弘基 木村研究室 (物理学専攻)

希土類化合物などの重い電子系物質では、近藤効果により伝導電子(*c*)と局在電子(*f*)が混成(*c-f*混成)して、有効質量が自由電子の 10^4 倍に達する重い準粒子が出現する。最近の研究において、バッファ層で挟んで多層膜化した希土類化合物の膜厚を制御することで重い電子系の量子臨界性を制御できることが報告され、物質の次元性もまた混成強度に強く影響を与えることが分かってきた[1]。しかしながら、これまでの重い電子状態を示す物質は薄いものでも10nm以上の薄膜であり完全な二次元物質とは言い難い。そこで我々は、貴金属(111)表面上に希土類元素を蒸着させて形成する単原子層合金に着目し[2]、理想的な二次元系である単原子層物質における重い電子状態の実現を目指した。そこで、この物質群の一つであり Cu(111)基板上に Yb を蒸着させて形成する単原子層合金 YbCu₂ を超高真空下で作製し、角度分解光電子分光法(ARPES)により電子状態を観測することで、重い電子状態の形成を調べた。

ARPES 測定の結果、二次元の *c-f* 混成バンドの形成と、重い電子系に特徴的な近藤共鳴ピークの温度依存性を観測し、約 30K で重い電子が形成されることがわかった。これらの結果は、単原子層物質において重い電子状態が出現したことを示す初めての証拠である[3]。

[1] H. Shishido, et al., *Science* 327, 980 (2010). [2] L. Fernandez et al., *Nanoscale* 12, 22258 (2020). [3] T. Nakamura, H. Sugihara et al., *Nat. Commun* 14, 7850 (2023).

量子ドット列を用いたスピン量子ビットの中距離量子結合の研究

湯田 秀明 大岩研究室 (物理学専攻)

半導体量子ドット内に閉じ込められた電子スピンは、その長いコヒーレンス時間から量子コンピュータを実現するための量子ビットの有力な候補の一つとなっている。近年、量子計算に必要な基本操作(初期化、読み出し、量子ゲート操作)の忠実度が99%を超え、残る大きな課題はその集積化となっている。集積化の方法として、同一チップ内で分割した量子計算ユニットを結合させるという方法が提案されており、離れた場所に量子ビットを伝送する技術の開発が喫緊の課題となっている。我々はそのような中距離(~10 μ m)の伝送を実現するための研究をしている。

中距離伝送を実現するための方法として、我々は量子ドット列を用いて作成したスピン鎖とその間の交換相互作用を用いた断熱操作による方法(断熱量子状態転送、AQT)と、量子ドット列のポテンシャル操作によって単一電子を一方から他のサイトへ運搬する方法の二つを検討している。我々はその二つの方法のそれぞれについて数値シミュレーションを行った。その結果、AQTに関して、パルス形状最適化による伝送の高速、高忠実度化の改善を行った。また、それを実験によって実証するため、Siの3重量子ドットデバイスの調整を行った。本講演では、そのシミュレーションとデバイス調整について報告する。

112 型鉄系超伝導体における As サイト部分置換による超伝導転移温度の上昇

須崎 洋岳 工藤研究室 (物理学専攻)

鉄系超伝導体は、FeAs 層とそれを隔てるスパーサー層の交互積層からなる層状構造を示す。本研究では、As¹⁻ジグザク鎖層をスパーサー層として持つ 112 型 $\text{Ca}_{1-x}\text{Ln}_x\text{FeAs}_2$ ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}$)[1]に着目し、超伝導物質開発を行なった。As¹⁻が様々な形態を取りうるため、112 型の構造は比較的柔らかいと予想される。さらに、鉄系では一般に対称性が高いほど超伝導転移温度 T_c が高いが[2]、112 型は対称性の低い単斜晶であるにもかかわらず比較的高い T_c を示す[1]。これらのことから、化学置換による構造制御を行うことで、さらに高い T_c の超伝導発現を期待することができる。

112 型において、Ca サイトと As サイトへの化学置換を系統的に行い、 T_c 、超伝導体積分率、格子定数の変化を調べた。その結果、112 型の As サイトに僅かな量の Bi を部分置換すると、 T_c が大きく上昇することが分かった。置換できる Bi の量が僅かであるため、今のところ、 T_c が上昇した理由は不明である。一方、As サイトに Sb を部分置換した試料では、Sb 量を連続的に変化させることができた。その結果から、格子定数が As ジグザグ鎖の方向に大きくなるほど T_c が上昇することが明らかになった。さらに、Sb と Bi を同時に部分置換した試料では、112 型における T_c の最高値を観測した。

[1] K. Kudo, *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **83**, 093705 (2014).

[2] C. H. Lee *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77**, 083704 (2008).

様々な四面体構造を持つ遷移金属化合物の新物質・新超伝導体開発

花田 洸志 工藤研究室 (物理学専攻)

本研究では、価電子数が少ない p ブロック元素が示す化学結合の多様性と d^8 遷移金属が作る配位多面体の高自由度[1]に着目して、新物質開発を行った。 p ブロック元素として Ge、遷移金属として Pd を用い、物質開発を行なった結果、新たな層状遷移金属化合物を 2 つ発見した。どちらも Pd と Ge からなる四面体の層を持つ。一つ目の化合物は、中心原子が Ge、配位原子が Pd と Ge である四面体を持ち、空間反転対称性が破れた結晶構造を示す。二つ目の化合物は、歪んだ四面体を持ち、原子サイトの一部が Pd と Ge によって無秩序に占有されている。磁化測定により、前者が $T_c = 2.7 \text{ K}$ の超伝導体であることが明らかになった。一方、後者は 1.8 K まで超伝導を示さなかった。電気抵抗率の温度依存性を Bloch-Grüneisen の式を用いて解析した結果は、両者のデバイ温度が同程度であることを示している。さらに、前者の残留抵抗比が後者よりも 10 倍程度大きく、この系の超伝導が乱れに依存しているように見える。したがって、本系の超伝導を電子格子相互作用[2]を用いて説明できない可能性がある。今後、本系において、空間反転対称性の破れに起因した物性を探索することが重要と考えられる。

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

[2] W. L. McMillan, *Phys. Rev.* **167**, 331 (1968).

三角形・ハニカムネットワークを持つ Eu 化合物の開発と 価数転移の観測

真鍋 馨 工藤研究室 (物理学専攻)

磁性元素の三角形ネットワークでは、磁気フラストレーションに起因してスキルミオン、スピングラス、スピン液体などの興味深い物性が発現する[1]。一方、遷移金属とニクトゲンからなるハニカムネットワークでは、非従来型超伝導の発現が議論されている[2]。本研究では、それら2つのネットワークを含む新物質を発見した。

着目した物質は、PtAs₃の平面三角形を持つ正方晶の化合物である。本研究では、温度で多形を制御し、新たにPtAs₃三角形が平面上に並ぶ六方晶構造を発見した。この新構造では、Euの三角形ネットワークとPt、Asからなるハニカムネットワークが交互に積層している。単結晶試料を用い、磁化と抵抗の温度依存性を測定した結果、50 Kで急激なジャンプを観測した。有効ボーア磁子を見積もると、50 KでEu²⁺からEu³⁺へ部分的に価数転移していることが示唆された。価数転移は、磁性、輸送現象、結晶構造を大きく変える要因となり、物性を多様にする。本研究では、磁性元素の三角形ネットワークとPtAsハニカムネットワークの物性と相関、さらに、価数転移を研究することのできる新しい化合物を見つけることができた。

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

[2] 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).

トポロジカル超伝導体候補 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

守安 悠人 工藤研究室 (物理学専攻)

MX_2 (M = 遷移金属、 X = ニクトゲン or カルコゲン)では、 M の d と X の p のエネルギーとフィリングに応じてさまざまな結晶構造が形成されるので[1]、 M と X の組み合わせと電子数に着目した物質開発が可能である。同じ元素の組み合わせで複数の結晶構造をとる多形現象を示すこともあり、その場合は構造の不安定性を期待することができる。本研究では、多形を示すPdBi₂の低対称相に化学置換による電子ドーピングと化学圧力印加を行なった結果、超伝導転移温度 T_c の上昇を観測した。

この相では、Pdジグザク鎖が形成されているため構造が歪んでおり、Pdの三角形ネットワークがバックリングしている。化学置換によりバックリングが解消する方向へ構造を変化させると、 T_c が1.7 K [2]から2.31 Kに上昇した。母物質では、表面とバルクのバンド構造が詳しく調べられており、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分散の存在が示唆されている[3,4]。本研究では、トポロジカル超伝導体の候補物質として重要と考えられている本系において、 T_c を上昇させることに成功した。

[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).

多形および電子数の制御によるハニカムネットワークを持つ 新超伝導体の開発

和田 大輝 工藤研究室 (物理学専攻)

ハニカムネットワークを持つ物質では、構造の対称性から、鉄系や銅系の正方形ネットワークとは異なる新奇な超伝導状態の発現を期待することができる。興味深い系は、Pt と Pn からなるハニカムネットワークを持つ六方晶 $AEPtPn$ (AE : アルカリ土類金属、 Pn : ニクトゲン) である。超伝導を示す $SrPtAs$ [1] と $BaPtSb$ [2] において、カイラル d 波やカイラル p 波の超伝導発現の可能性が議論されている[3,4]。これらの議論はフェルミ面の形状に強く依存しているため、構成元素や結晶構造の異なる六方晶 $AEPtPn$ を開発することは新たな超伝導状態を探索するための有用なルートとなる。

本研究では、ハニカムネットワークを持つ新たな物質を2つ見つけた。(1) 正方晶 $AEPtAs$ に着目し、温度と圧力で多形を制御することで、歪んだ $PtAs$ ハニカムネットワークを持つ新構造の生成に成功した。(2) さらに、その化合物に電子をドーピングし、歪みの原因となる化学結合を切断することで、歪みのないハニカムネットワークを持つ六方晶の化合物を新たに開発した。磁化と比熱を測定した結果、その化合物が転移温度 1.3 K の超伝導体であることがわかった。

[1] Y. Nishikubo, K. Kudo, and M. Nohara, *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] M. Kudo *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **2164**, 012015 (2022).

物理学専攻
物性グループ
会場：D403
2月14日（水）

SQUID 磁束計による 100 mK 極低温磁化測定のための 断熱消磁冷凍機の開発

三川 基 萩原研究室 (物理学専攻)

強相関電子系物質の超伝導やフラストレート系物質の量子スピン液体といった量子物性現象を研究する上で、極低温での磁化測定は有効な実験手法の一つである。我々の研究室は、超伝導量子干渉素子(SQUID)を用いた精度の高い磁化測定装置である、カンタム・デザイン社製 SQUID 磁束計(MPMS-XL7)を所有している。本研究では、この装置の最低到達温度 1.8 K を大きく下回る 100 mK オーダーの極低温域での磁化測定実現を目標に、SQUID 磁束計に搭載可能な断熱消磁冷凍機の開発を行った。磁気冷却材料である GGG($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$)の単結晶基板 (1 枚 $10 \times 5 \times 0.5$ mm)を SQUID 磁束計のピックアップコイルの長さ(30 mm)より十分長くなるように均等に複数枚並べ、さらにこの中央に測定対象となる試料を配置するという独自の工夫を行った。それにより、磁化測定の妨げとなる GGG 基板の磁化に由来するバックグラウンドの抑制と、磁気冷却材料と測定試料を直接熱接触させることによる高い冷凍能力の両立を実現した。その結果、最低到達温度 0.18 K を確認し、約 12 時間 2 K 以下の極低温状態を維持することに成功した。さらに、希土類磁性体 $\text{KBaYb}(\text{BO}_3)_2$ を磁気冷却材料として追加することで、0.10 K の最低温を確認した。発表では SQUID 磁束計用断熱消磁冷凍機開発についての詳細と、0.85 K 以下で超伝導転移を示す亜鉛や、フラストレート磁性体として知られている $\text{Cs}_3\text{Fe}_2\text{Cl}_9$ などの極低温磁化測定の結果について報告する。

量子スピンラダー系 $\text{Cu}(\text{DEP})\text{Cl}_2$ の強磁場磁性と圧力効果

森本 大幹 萩原研究室 (物理学専攻)

スピンラダー系物質 $\text{Cu}(\text{DEP})\text{Cl}_2$ (DEP:2,3-diethylpiradine)は、 Cu^{2+} ($S=1/2$) イオンが二本足の梯子鎖を形成し、低温で非磁性基底状態と磁氣的励起状態の間にスピンギャップを持つ。このギャップはスピンに直接作用するゼーマン相互作用を通して磁場の印加により消失し、磁場誘起量子相転移を起こす[1]。一方で、圧力印加によっても結晶構造変化に起因して交換相互作用の変調が起こる事で、新奇な物理現象の発現が期待される。既に類似のスピンラダー系物質である $\text{Cu}(\text{DEP})\text{Br}_2$ において、圧力印加による劇的な磁性の変化が報告されている[2]。そこで本研究では、 $\text{Cu}(\text{DEP})\text{Cl}_2$ においても強磁場、高圧力を組み合わせた磁気測定を行い、スピンラダー系における相互作用と磁性の相関を明らかにすることを目的として研究を行った。その結果、磁化率測定では 0.2 GPa 付近で磁化率のピークが急激に高温にシフトして低くなる振る舞いを観測し、パルス強磁場磁化測定においても同圧力帯でスピンギャップの消失が起こる H_{c1} と飽和磁場 H_{c2} が急激に高磁場側へシフトする振る舞いを観測した。以上の結果に対して、量子モンテカルロ法を用いた数値計算による解析を行ったところ、本研究で見出した $\text{Cu}(\text{DEP})\text{Cl}_2$ の圧力誘起相転移は横木方向の交換相互作用の急激な増加によって引き起こされていることが明らかとなった。

[1] T. Morimoto *et al.*, JPS Conf. Proc. **38**, 011146 (2023).

[2] E. Morikawa, Master thesis 2021 FY, Osaka University.

ペロブスカイト型マンガン酸化物の自立型メンブレンにおける磁気特性

厚美 竜二 松野研究室 (物理学専攻)

近年、水溶性犠牲層を利用したエピタキシャルリフトオフ法が確立され[1]、劈開が困難な物質に対しても自立型メンブレンの合成が可能となった。ナノメートル膜厚の遷移金属酸化物メンブレンは、バルクに比べて優れた弾性を示すため[2]、格子の引っ張り歪[2]や歪勾配[3]による物性制御が期待される。本研究では、室温強磁性体であり、磁気・電気特性が格子と強く結合したペロブスカイト型酸化物のひとつである $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ において、水溶性犠牲層を用いたメンブレンの作製と歪による磁気特性の制御に成功した。

パルスレーザー堆積法を用いて、 $\text{SrTiO}_3(001)$ 基板上に 60 nm AlO_x キャップ層/22 nm $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ /22 nm $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 水溶性犠牲層を堆積した。この 3 層構造を純水に浸漬することで、犠牲層が選択的に溶出され、基板から剥離された $\text{AlO}_x/\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ メンブレンが得られた。ここで、 AlO_x は剥離過程でのクラック生成を抑制するために導入した。詳細な構造評価から、3 層構造内の $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ は、下部層から 2.1% の引っ張り歪を受けたエピタキシャル薄膜であった。一方、 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ メンブレンではエピタキシャル歪が緩和していることがわかった。磁化測定の結果から、メンブレンでは、エピタキシャル薄膜と比べて、室温での飽和磁化が 2 倍程度増大していることが明らかになった[4]。これは、エピタキシャル歪の緩和によって Mn-O-Mn 距離が収縮することで、強磁性相互作用が増強されたためと考えられる。

次に、Pt 薄膜をキャップ層としてメンブレンを作製した。剥離過程での歪緩和機構が AlO_x キャップとは大きく異なり、メンブレンに周期的なシワが形成された。Kerr 顕微鏡によってシワ形状に応答した磁気特性の変調が観測されたことから、メンブレンのシワが歪勾配として機能していると考えられる。以上から、Mn 酸化物の歪による物性制御において、メンブレン形態の試料が有効であることが示された。

[1] D. Lu *et al.*, Nat. Mater. **15**, 1255 (2016). [2] S. S. Hong *et al.*, Science **368**, 71 (2020). [3] G. Dong *et al.*, Adv. Mater. **32**, 2004477 (2020). [4] R. Atsumi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **62**, 100902 (2023).

三層膜 $\text{MgO}/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}/\text{IrO}_2$ におけるスピン軌道トルク誘起磁化反転

沖本 稜弥 松野研究室 (物理学専攻)

電子のスピン角運動量の流れであるスピン流は、省電力磁気デバイス実現の鍵である。中でも、非磁性体と強磁性体との界面を持つ 2 層膜構造において、スピン軌道トルク生成が電流-スピン流変換に由来する機能として注目されている。スピン軌道トルクは、強いスピン軌道相互作用に起因するスピンホール効果から誘起され、隣接する磁性層の磁化を反転させる [1]。最近では、5d 遷移金属の酸化物である非晶質イリジウム酸化物 IrO_2 が高いスピン軌道トルク生成効率 [2] を示しており、実績のある 5d 遷移金属 Pt [1] や Ta と同程度であることが報告されている。しかし、 IrO_2 を用いての磁化反転の報告はなくデバイス応用に向けてスピン軌道トルク誘起磁化反転の実証が求められている。

磁化反転実証を目的として、本研究ではマグネトロンスパッタ法により熱酸化 Si 基板上的三層膜 $\text{MgO}/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}/\text{非晶質 IrO}_2$ を成膜した。初めに成膜条件の最適化を行い、磁化測定とホール抵抗により磁気異方性を評価することで、磁化反転の前提となる強い垂直磁気異方性を持つ強磁性層 $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$ が得られたことを確認した。次に、フォトリソグラフィとリフトオフにより作製したホールバーにおいて高調波ホール抵抗を測定し、その生成効率が先行研究 [2] の値を再現することを見出した。最後にスピン軌道トルクと面内磁場を用いた磁化反転の検証としてホール抵抗のパルス電流依存性を測定し、臨界電流でホール抵抗が反転するヒステリシス曲線を観測した。この結果は、 IrO_2 を用いたスピン軌道トルク誘起磁化反転の実現を示唆し、同酸化物を構成要素とする省電力磁気デバイス応用への可能性を切り拓く成果である。

[1] I. M. Miron *et al.*, Nature **476**, 189 (2011). [2] K. Ueda *et al.*, Phys. Rev. B **102**, 134432 (2020).

鉄系超伝導体 Fe(Se,Te)薄膜積層構造における非相反伝導現象

小林 友祐 松野研究室 (物理学専攻)

空間反転対称性の破れた物質や薄膜積層構造において、様々な非相反現象が注目されている。特に、極性物質や反転対称性が破れた界面における超伝導状態では、磁場中で巨大な非相反伝導効果や超伝導臨界電流の整流効果など興味深い輸送現象が報告されている[1-3]。その起源として、Rashba 型スピン軌道相互作用[1-3]や磁束運動のラチェット効果[4]の他、試料形状の非対称性による外因的な機構[5]が提案されている。本研究では、超伝導状態における非相反効果増大現象の起源解明を目的に、磁場中でも比較的大きな臨界電流を示す鉄系超伝導体 Fe(Se,Te)の積層構造を作製し、二次高調波抵抗測定と臨界電流測定を行った。

フォトリソグラフィ及びパルスレーザー堆積法により、空間反転対称性の破れた 20 nm Fe(Se,Te)/20 nm FeTe 薄膜積層構造をチャンネルとした細線形状の素子を作製した。水溶性犠牲層を用いた水リフトオフ法によって素子加工することで、as-grown の薄膜と同程度となる転移温度 $T_c \sim 12$ K の超伝導細線素子が得られた。二次高調波抵抗の磁場及び温度依存性から、 T_c 以下で非相反係数 γ の増大を観測した。また、超伝導状態における磁場中の電流電圧測定から、臨界電流の整流効果を観測した。得られた臨界電流整流効率 η と非相反係数 γ を比較すると、 $\gamma \propto \eta/HT$ (H :印加磁場、 T :試料温度)の普遍的な比例関係があることがわかった。以上から、本薄膜素子における非相反伝導効果の増大に、磁束運動のラチェット効果が重要な役割を果たしていることが明らかになった[6]。

[1] T. Ideue *et al.*, Nature Phys. **13**, 578 (2017). [2] R. Wakatsuki *et al.*, Sci. Adv. **3**, e1602390 (2017). [3] F. Ando *et al.*, Nature **584**, 373 (2020). [4] Y. M. Itahashi *et al.*, Phys. Rev. Res. **2**, 023127 (2020). [5] Y. Hou *et al.*, Phys. Rev. Lett. **131**, 027001 (2023). [6] Y. Kobayashi *et al.*, in preparation.

フェムト秒パルスレーザー脱離イオン化イメージング質量分析装置の空間分解能評価

西澤 正崇 豊田研究室 (物理学専攻)

イメージング質量分析は、試料表面の物質のマススペクトルとその位置情報を結びつけることで、分析物の二次元空間的な分布を取得することができる手法である。物質のイオン化にナノ秒パルスレーザーを用いた走査型イメージング質量分析の空間分解能は、レーザー光の集光径に制限されてしまい、 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 程である。ところで、レーザー加工の分野では、フェムト秒パルスレーザーによる微細加工技術が発展している。ここで用いられるレーザーのパルス幅は数百フェムト秒であり、これはレーザーによって電子に与えられたエネルギーが電子-格子相互作用で格子に伝わる時間よりも大幅に短い。そのことにより、物質の照射点が熱平衡状態に達する前にパルスが終了するため、非熱的かつ集光径よりも小さい範囲での加工が可能となる。フェムト秒レーザー加工のプロセスは、非熱的にイオン化し物質を試料面から取り除く効果、微小領域のみ反応が生じるなどの特徴がある。これらの特徴はイメージング質量分析においてもより高い空間分解能の実現や、試料への損傷が低減されるといった利点となることが期待される。

本研究では、フェムト秒パルスレーザーを導入した飛行時間型イメージング質量分析装置の開発を行った。さらに改良を加え、試料表面でレーザー光を高速掃引する機構を加えたイメージング質量分析を可能にした。また、イメージング質量分析測定で得られた結果から空間分解能の評価を行った。

タッピングモード走査型プローブエレクトロスプレーイオン化法による リン脂質生合成障害マウス精巣の高空間分解能質量分析イメージング 岡田 茉樹 豊田研究室 (物理学専攻)

質量分析イメージング (MSI) とは、試料内の複数の分子の分布情報を可視化する技術である。タッピングモード走査型プローブエレクトロスプレーイオン化法(t-SPESI)は、大気圧サンプリングイオン化法の一つであり[1]、生体組織の MSI に応用することで、組織中の脂質分布をイオン像として可視化することができる。

t-SPESI では、上下方向に振動するプローブに高電圧を印加した溶媒を流しながら、試料とプローブを断続的に接触させる。プローブ先端と試料表面の間に液架橋が形成され、試料成分が抽出される。プローブが試料表面から分離されると、抽出液のエレクトロスプレーイオン化 (ESI) が生じ、試料成分の気相イオンが生成される。イオンは質量分析計に導入され、マススペクトルが取得される。

t-SPESI で生体組織の細胞の成分分布を詳細に捉えるには、空間分解能の向上が必要である。本研究では、空間分解能向上を目的として、液架橋の体積を縮小する方法と試料成分イオンを高感度に検出する方法を検討した。また、装置開発に加え、健康なマウスと、精子形態異常が人為的に誘導された疾患マウスの精巣組織の高空間分解能 MSI を実施した。さらに、病理診断で用いられるヘマトキシリン・エオシン (H/E) 染色を、MSI を実施した同一組織に施した。H/E 染色像とイオン像を比較した結果、精巣組織の脂質分布が、細胞の形態情報に基づいて判断される細胞分化の段階によって変化することを新たに見いだした。t-SPESI による高空間分解能 MSI は、生体組織の細胞情報の可視化において活用されることが期待される。

[1] Y. Otsuka *et al.*, *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **26**, 2725-2732(2012).

マルチターン飛行時間型質量分析計を用いた土壌中ガスの連続測定 鈴木 舜也 豊田研究室 (物理学専攻)

CO₂ や N₂O など土壌中のバクテリアによって生成されるガスを測定することで、その土壌の状態を明らかにし、農業における圃場の土壌改善等に役立てることができる。土壌ガスの生成量・消費量は、環境要因 (土壌温度、水分、pH、降雨量等) に影響される。それらは数分から数時間以内に変化していくため、高い時間分解能で土壌ガスを測定することが求められている。

これまで、当研究室で開発されたマルチターン飛行時間型質量分析計とクローズドチャンバーを組み合わせた手法を用いることで、土壌表面から排出されるガスの高頻度でのオンサイト連続測定を行ってきた。しかし、この手法では、ガスを土壌深さ方向に積算してチャンバー内に捕集し、測定しているため、深さによるガス濃度変化の違いを捉えることは困難である。本研究では上記の問題を解決するため、土壌中の複数点においてガスをサンプリングし、測定する手法を確立した。これにより、深さによる土壌の状態の違い (地下水の有無や土壌成分の違い) を知ることができる。実際にその手法を用いて、オンサイトを模擬した環境下における土壌中ガスの長時間での連続測定を行った。

低キャリア密度の層状希土類化合物 $R\text{Te}_{2-x}\text{Sb}_x$ における 磁気抵抗効果の研究

岩瀬 圭祐 花咲研究室 (物理学専攻)

層状希土類化合物 $R\text{Te}_2$ (R : 希土類元素) は、正方格子を形成する Te 由来のフェルミ面のネスティングにより、電荷密度波状態が実現した少数キャリアの磁性半導体である。Te の一部を Sb で置換することでキャリア密度をさらに希薄にした $\text{CeTe}_{2-x}\text{Sb}_x$ では、低温弱磁場で電気抵抗率が 4 桁程度減少する巨大な負の磁気抵抗効果が発現することが知られている[1]。私は 4f 電子の磁性と磁気抵抗効果との関係を調べるために、Ce を他の希土類元素に置換した試料の合成に取り組み、 $\text{PrTe}_{2-x}\text{Sb}_x$ ($0.00 \leq x \leq 0.73$) と $\text{GdTe}_{2-x}\text{Sb}_x$ ($0.18 \leq x \leq 0.50$) について様々なキャリア密度の単結晶合成に成功した。2 K において 9 T まで磁化と電気抵抗率の測定を行った結果、0.4 T 程度で強制強磁性状態となる $\text{CeTe}_{2-x}\text{Sb}_x$ とは対照的に、いずれの試料とも磁化は飽和せず、2%~150%程度の電気抵抗率の増加(正の磁気抵抗効果)が観測された。パルス強磁場下で測定したところ、 $\text{GdTe}_{2-x}\text{Sb}_x$ については 20 T 以上で強制強磁性状態となり、電気抵抗率は一定値となった。一方で $\text{PrTe}_{2-x}\text{Sb}_x$ については、50 T でも磁化が飽和していなかった。この結果について、各物質中の局在磁気モーメント間にはたらく相互作用の大きさを比較することにより、磁気ポーラロン形成のしやすさと磁気抵抗効果との関係性について議論する。

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

反強磁性金属 SrMnBi_2 の磁気圧電効果に起因する新奇輸送現象

宮本 雄哉 花咲研究室 (物理学専攻)

近年、磁気秩序によって空間反転対称性と時間反転対称性が同時に破れる金属において、圧電効果の金属版となる磁気圧電効果が発現することが、拡張多極子の理論から予測された[1]。さらに実験的にも、 EuMnBi_2 における反強磁性秩序した Mn 層の磁気圧電効果が、電流誘起の微小な格子歪みとしてレーザードップラー振動計により観測された[2]。しかし、この効果が本質的にはフェルミ面の変形が引き起こす現象であるにも関わらず、電子物性における直接観測はなされていなかった。

そこで本研究では、磁気圧電効果を電子輸送現象において観測することを目的とした。対象物質は、磁気圧電効果と直接関係のない磁性元素 Eu を非磁性の Sr に置換した、よりシンプルな反強磁性金属 SrMnBi_2 とした。本物質では層間方向の電流に比例する ab 面内の格子歪みが生じるため、磁気圧電効果による ab 面内の 4 回回転対称性の破れが期待される。そこで電流誘起歪みによるフェルミ面のサイズ変化を観測するための量子振動測定と、 ab 面内の 4 回回転対称性の破れを観測するための面内回転磁場中での非相反抵抗測定を行った。前者では、量子振動の周波数が印加電流の増加に対して変化する結果は得られなかった。しかし後者では、磁気圧電効果から期待される 2 回対称の角度依存性を観測し、輸送現象における検出に初めて成功した。

[1] H. Watanabe *et al.*, *PRB* **96**, 064432(2017). [2] Y. Shiomi *et al.*, *PRL* **122**, 127207(2019).

fcc 型ハイ/ミディアムエントロピー合金の局所構造解析

古谷 大樹 花咲研究室 (物理学専攻)

ハイ/ミディアムエントロピー合金(H/MEAs)は、複数の金属元素を等比で混ぜ合わせた合金であり、その優れた力学的特性から、現在注目を浴びている材料である。従来の合金と違い、溶質元素と溶媒元素の区別がつかない H/MEAs には従来の固溶強化モデルは適用できない。H/MEAs における強度と構造の関係性について、様々な研究が行われている。先行研究の第一原理計算において、合金内の原子の格子点からの変位量に元素依存性があり、変位量の平均が合金の強度に比例することが示唆された[1]。また、元素によって変位しやすさに違いがあることも示唆されている[1,2]。この原子変位の傾向を実験的に明らかにするために、Cr-Mn-Fe-Co-Ni 系の H/MEAs において、広域 X 線吸収微細構造 (EXAFS) の解析を行った。

合金内の各元素周辺の局所構造乱れを表す、デバイーワラー因子を算出した結果、実験対象となった全ての H/MEAs において、Cr 周りの構造乱れが他の元素と比べて大きいことがわかった。原子が変位すると、周辺原子との距離に偏差が生じ、デバイーワラー因子が大きくなると考えられる。よってこの結果は、先行研究の理論計算において、Cr の原子変位が他と比べて大きな値を取る傾向にあることと一致している。

また、H/MEAs の一つである CrCoNi に関して、単結晶 X 線回折によって観測された散漫散乱や超格子反射についても報告する。

[1] N. L. Okamoto *et al.*, *AIP Advances*, **6**, 125008 (2016).

[2] K. Niitsu *et al.*, *Materials Transactions*, **61**, 1878 (2020).

ファンデルワールス反強磁性体 $R\text{Te}_3$ 薄膜の電気伝導測定

浅間 遼太郎 新見研究室 (物理学専攻)

$R\text{Te}_3$ (R = 希土類金属)は磁性を有する R -Te 層と伝導を担う Te-Te 層を持ち、Te-Te 層がファンデルワールス力で結合した層状反強磁性体である。 $R\text{Te}_3$ は高い移動度を持つことに加え、電荷密度波(CDW)と反強磁性秩序の共存が知られており、基礎・応用の両面で注目されている。特に TbTe_3 は CDW 変調を受けた反強磁性秩序(CDW-modulated AFM : CMM)の存在が示唆された[1]。しかし、磁気構造を含め CMM の発現機構など詳細は未解明である。また、昨年 DyTe_3 がらせん磁性を有することが新たに報告され[2]、 TbTe_3 との関連性など詳細な研究が求められている。このように特異な磁気特性を有することから豊富な輸送特性が期待されるが、 $R\text{Te}_3$ の酸化による測定の難しさから薄膜での測定報告は少ない。

そこで本研究では、機械的剥離法とドライトランスファーを用いて、 TbTe_3 、 DyTe_3 、 LaTe_3 の薄膜素子を作製し、8 T までの磁場下で電気伝導測定を行った。素子作製の過程で、素子を六方晶窒化ホウ素でキャッピングすることにより酸化を防ぎ、 LaTe_3 薄膜では残留抵抗比が 137、磁気抵抗比が 2000 %を示すほどの純良な素子作製に成功した。 TbTe_3 薄膜の抵抗の温度依存性からは反強磁性転移に伴う抵抗の減少を観測した。さらに、磁気抵抗やホール抵抗の Two Band Model によるフィッティングから移動度やキャリア数を見積もった。また、 DyTe_3 や LaTe_3 では初めて薄膜測定を行い、 $R\text{Te}_3$ 薄膜素子の輸送特性について系統的に考察することができたため、本発表ではこれらの詳細について報告する。

[1] S. Chillal *et al.*, *Phys. Rev. B*, **102**, 241110 (2020).

[2] S. Akatsuka *et al.*, arXiv:2306.04854[cond-mat. mtri-sci] (2023).

層状物質Pt(Bi_{1-x}Se_x)₂薄膜の超伝導特性と逆スピホール効果の観測

前田 将輝 新見研究室 (物理学専攻)

層状超伝導体は、機械的剥離法によってバルクの良質な結晶性と清浄な界面を保ったまま理想的な薄膜試料が得られるため、スピン輸送やジョセフソン接合などの微細加工を伴う素子の開発や、新しい物理現象の発見が期待できる。その中でも層状超伝導体PtBi₂は強いスピン軌道相互作用をもつため、超伝導状態におけるスピン輸送現象など特異な物理現象が期待されるが、超伝導転移温度 T_c は0.6 Kと低いという弱点がある。そこで本研究ではPtBi₂にSeドーピングすることで最大2.4 Kまでの T_c の上昇が報告された層状超伝導体Pt(Bi_{1-x}Se_x)₂に着目し[1]、電気輸送測定によって薄膜における T_c [2]や上部臨界磁場 B_{c2} などの超伝導特性を調べることを目的とした。特に B_{c2} 測定では、 B_{c2} 近傍で外部磁場の掃引方向に依存した磁気抵抗のヒステリシスが観測され、この現象はSeドーピングに伴う超伝導の不均一性と Two-level critical-state model によって説明できることが分かった。またPt(Bi_{1-x}Se_x)₂は強いスピン軌道相互作用をもつためスピン輸送測定において大きな信号が得られると期待される。そのため本研究ではスピン輸送素子を作製し、常伝導及び超伝導状態における逆スピホール効果の観測も目指した。本発表では、Pt(Bi_{1-x}Se_x)₂薄膜の超伝導特性と逆スピホール効果の詳細について報告する。

[1] K. Takaki *et al.*, J. Phys. Sci. Jpn. **91**, 034703 (2022). [2] M. Maeda *et al.*, JPS Conf. Proc. **38**, 011036 (2023).

宇宙地球科学専攻

会場：D303

2月13日（火）

二次元粒子配列の秩序度における粒子サイズ二分散性と 粒子間接触状態の影響

土草一輝 桂木研究室 (宇宙地球科学専攻)

ランダム性を持つ多粒子系の挙動を模擬する実験や数値計算を行う場合、単一サイズ粒子のみを用いると粒子配置が秩序的になり、ランダムな粒子配置を実現することが困難になる。この困難を克服するため、異なるサイズの二種類の粒子(大粒子と小粒子)を混合させる二分散系がしばしば用いられる。しかし、どの程度の二分散性がどの程度の粒子配置を無秩序化するののかについて、定量的検証はこれまで十分に行われていなかった。そこで本研究では、二次元系において二分散性と粒子配置秩序度合いの関連について実験的に調べた。実験においては、磁気双極子間相互作用により相互反発する非接触磁石粒子系と、円盤粒子を用いた接触粒子系の二つの系を用いた。前者は粒子間の接触が起こらないため粒子間摩擦が働かないのに対し、後者は通常が多粒子系同様に粒子間摩擦が系の挙動を主に支配する。この両方で二分散性による粒子配置の無秩序化に差異がみられるかを調べた研究はこれまでなかった。そこで本研究では、粒子配置に基づくボロノイ分割法と局所的な配向秩序特徴量を系全体で平均した大局的秩序化指標を、二次元の非接触・接触多粒子系で、二分散性の程度を変化させながら計測した。結果として、接触系・非接触系共に大粒子と小粒子の数値比がほぼ等しい時に粒子配置秩序が最も破壊されていることが確認された。この結果は、接触系における粒子間接触力ネットワークが作るフォースチェーンの配向秩序による粒子配置構造の秩序化の影響とはやや異なる結果となった。

粒状斜面を駆け上がる球のエネルギー散逸

福本健 桂木研究室 (宇宙地球科学専攻)

自動車などの車両がオフロードを走行中に空回りしてしまい、走行不能(スタック状態)になることがある。このスタック状態に至る物理的素過程を理解するために、複雑な要素を可能な限り取り除き、粒状物質(ガラスビーズ層)の表層を、駆動力を与えずに慣性で転がる球にかかる抵抗、摩擦を調べる研究を行なった。粒状斜面を駆け下だる系や粒状平面を転がる系で球にかかる摩擦について調べられた研究はあるが、球が粒状斜面を駆け上がる際の減速挙動やエネルギー散逸、摩擦について調べられた研究はなかった。

そこで、本研究では、粒状斜面を駆け上がる球の挙動について実験的に研究を実施した。初速、初期角速度、斜面の傾斜角、球の密度を系統的に変化させて、粒状斜面を駆け上がる球の挙動を観測した。

その結果、粒状斜面を駆け上がる球は、粒状斜面をスリップし沈み込みながら侵入する様子の定量的説明に成功した。具体的には、このときの沈み込み深さは、球と粒状層の密度比でスケールされることが確認できた。また、並進と回転の運動はともに等減速の挙動を示した。ある実験条件においては、並進運動が先に静止し、回転挙動がしばらく残ること(スタック状態)も確認された。球の並進運動と回転運動を定量的に理解するためにそれぞれの運動についてのエネルギー散逸を評価した。回転については運動方程式よりスリップによる摩擦係数を見積もった。一方で並進運動については、エネルギー保存則から、粒状斜面の表面に溝が形成されることに由来する実効的摩擦係数を見積もった。この並進の摩擦係数は沈み込み深さに比例することが明らかになり、並進のエネルギー散逸は、主に球の沈み込みにより生じるものと考えられる。以上の結果から、スタックを含む球の挙動を定量的に予想する一連の力学関係式を得ることができた。

振動粒状斜面上に置かれた球体の運動と斜面流動化の関係

山本 侑樹 桂木研究室(宇宙地球科学専攻)

月面などの固体天体表面には、岩石が斜面を転がったと思われる跡が全球的に観測される。このような地形は、レゴリスと呼ばれる砂礫層の斜面上に静止していた岩石が、月震をトリガーとして斜面上を転落したことにより形成されたとする仮説がある。また、地球上で起こるがけ崩れは、急斜面上の土砂や岩塊が安定性を失って崩落する現象であり、豪雨あるいは地震等をきっかけに発生する。このように、振動粒状斜面とそこに置かれた物体との相互作用を理解することは、様々な自然現象や災害の発生過程解明において重要となる。しかし、振動粒状斜面上に置かれた物体の挙動に関する基礎的な研究はこれまでほとんど行われていない。

そこで本研究では、粒状斜面上に球体を置き、系全体を鉛直振動させる実験を行った。実験では、斜面構成粒子と斜面上に置かれた球体の密度比 ρ^* と、重力加速度に対する最大振動加速度の比 Γ を主たる変化パラメータとした。具体的手順としては、粒状斜面上に斜面構成粒子の数十倍の大きさを持つ球体を乗せて振動を開始し、斜面の緩和と球体の運動をカメラにより撮影した。撮影された映像から球体の重心位置及び斜面の傾きの時間変化を測定した。さらに、球体の粒状斜面への沈み込み深さ δ と、斜面表面の粒子速度と球体の速度の斜面平行成分との速度差 V_{gap} を計算し、それぞれの量を決定する物理機構を考察した。

実験の結果、球体の挙動を5つの相に分類した。観察された5つの相の中に月面での岩石の転落跡に対応するような挙動はなかった。しかし、 δ および V_{gap} の Γ 、 ρ^* に対する依存性を説明するモデルを実験結果に基づいて構築し、振動粒状斜面上の球体の運動に関する理解を深めることには成功した。

転位が岩石の非弾性に与える影響：有機多結晶体を用いたアナログ実験

佐々木勇人 現：海城中学高等学校

旧：武井研究室

(東大理学系地球惑星科学専攻)

地震波速度・減衰構造から地球内部の変形状態を推定するには、鉱物結晶中の欠陥である転位が岩石非弾性に与える影響を明らかにする必要がある。そのために本研究では、岩石アナログ物質としてボルネオールという有機多結晶体を試料に用いて、様々な差応力下で予め変形を加えた試料の非弾性を測定した。

まず、試料に転位を導入できる条件を探るために、封圧0.8 MPa下において1軸圧縮クリープ実験を行い、岩石アナログ物質の流動則を調べた。0.3–2 MPaの各差応力下で試料の歪速度を測定した。その結果、差応力が1 MPaを超えると歪速度の応力依存性が線形から冪乗則へと変わり、拡散クリープから転位クリープへと遷移した。転位クリープ後の試料では粒界が波打っており、転位密度の不均一を解消するために粒界移動が起こったと考えられる。

次に、転位クリープさせた試料の非弾性を測定するために、大気圧下で1軸強制振動実験を行った。100–10⁴ Hzの各周波数で試料に微小振動を加え、応力と歪を測定してヤング率と減衰を求めた(図)。試料を転位クリープさせた結果、100 Hz以下ではヤング率が6–8%減少し、減衰の増大も見られた。そこで超音波速度測定実験も行い、10⁶ Hzでのヤング率を求めると、変形前後で変化していなかった。従って、転位による非弾性緩和は10²–10⁶

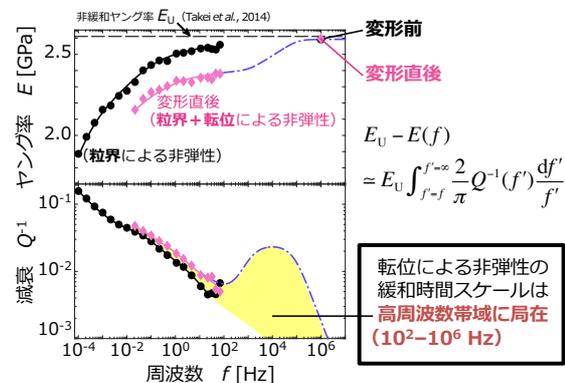


図. 転位クリープ前後での非弾性測定結果.

Hz の間にピークを持ち、粒界による非弾性緩和よりも高周波帯域で卓越することが明らかになった。

潮汐変形による視線速度変動を用いた連星 V723 Mon の質量推定

友善 瑞雄 住研究室 (宇宙地球科学専攻)

主星が潮汐変形している近接連星では、伴星の位相に応じて観測者から見た主星の面積が変化することで生じる光度変動(Ellipsoidal Variation; EV)を、軌道運動に伴う視線速度変動や、SED や射影自転速度 $v \sin i$ から得られる主星半径の情報と組み合わせることで連星質量を決定できる。実際、この手法を用いて X 線連星などの質量推定が行なわれている。しかし、降着円盤などの主星以外の光が混在していると、EV に基づく質量推定には系統誤差が生じる可能性が指摘されている(Kreidberg et al. 2012)。

この問題の解決策として、本研究では、潮汐変形した主星の吸収線輪郭が伴星の位相に応じて歪み、測定される視線速度に周期的なシグナルが加わることを利用した“潮汐 RV モデル”(Masuda & Hirano 2021; MH21)に着目する。このシグナルは EV と等価な情報を含むので、原理的には視線速度データのみを用いた、主星以外の光の影響を受けにくい連星質量の推定が可能である。

MH21 は潮汐変形した連星 V723 Mon に対し、潮汐 RV モデルで質量推定を行った($M_1 = 0.82^{+0.13}_{-0.14}M_{\odot}$, $M_2 = 2.95^{+0.17}_{-0.17}M_{\odot}$)が、後に El-Badry et al.2022 (=E22)で明らかになった伴星光を考慮していない主星半径の情報を用いていた。実際、E22 による伴星光を考慮した質量推定($M_1 = 0.44 \pm 0.06M_{\odot}$, $M_2 = 2.8 \pm 0.3M_{\odot}$)と MH21 は整合していなかった。

そこで本研究では V723 Mon を対象に、すばる望遠鏡 IRD を用いて観測された高分散分光スペクトルの吸収線幅から測定した $v \sin i$ を用いて、測光データを用いずに潮汐 RV モデルでの質量推定を行なった。モデルフィットの結果、本研究での質量推定($M_1 = 0.40^{+0.06}_{-0.05}M_{\odot}$, $M_2 = 2.43^{+0.18}_{-0.10}M_{\odot}$)と E22 は整合した。本研究は、潮汐 RV モデルでの質量推定が有用であると示す例となり、今後、暗くて重い伴星を持つ連星探査などで用いられることが期待される。

PRIME 望遠鏡検出器(H4RG-10)の非線形性補正

濱田龍星 住研究室 (宇宙地球科学専攻)

PRIME(Prime-focus Infrared Microlensing Experiment)望遠鏡は南アフリカ天文台(SAAO)に設置され、その広視野(約 1.45deg²)を利用して近赤外線での銀河系中心領域でのマイクロレンズ探査を行う。NASA/GSFC から提供された 4 台の HAWAII 4RG-10 (H4RG-10)を使用することで、近赤外線と広視野を実現している。

正確な測光観測のためには、H4RG 検出器システムの非線形性を補正することが重要になる。これまでの方法 (JWST パイプラインで使用されているものなど) では、安定した光源を使用して、線形信号が非線形信号にどのように変換されるかを測定することで、非線形性を補正していた。これは光源に対して、無視できるほど暗電流が小さい、或いは、完全に線形な暗電流の仮定のうえで成り立つ。PRIME の場合、検出器は約 115K で動作しているため、暗電流が上昇し、非線形暗電流を示す pixel が増加してしまっている。これは、従来確立されていた方法による非線形補正の性能の妨げとなる。そこで、このような場合に非線形性を補正する新しい方法を考案し、その実用性を検証した。

結果として、4 台の検出器それぞれで、全体に対して約 20%, 30%, 10%, 40%の pixel では新しい方法での補正の方がより線形に補正できることが分かった。将来、時間が経過するにつれて、検出器は劣化していく可能性があり、新しい補正方法がますます重要になると考えられる。

B&C 望遠鏡への可視光/近赤外線同時観測装置の導入検討

藤田 捷暉 住研究室 (宇宙地球科学専攻)

我々のグループでは重力マイクロレンズ法による系外惑星探査を行っている。この手法では、光源天体と観測者の間を他の天体（レンズ天体）が通過する際にレンズ天体の重力により光源天体の光が曲げられ、光源天体の一時的な増光として観測される現象（重力マイクロレンズ現象）を利用し系外惑星を探査する。しかし、この現象は非常に稀な現象 (10^{-6} event/star) であるため、本手法による系外惑星探査は星密度が高い領域を広視野・高頻度観測する必要がある。そのため、広視野望遠鏡を用いた銀河系中心方向の高頻度サーベイ観測によりマイクロレンズイベントを検出し、重要度の高いイベントを追って詳細観測している。重要度の高いイベントとは、マイクロレンズ現象による増光が特に明るくなる高増光率イベントのことで、小口径望遠鏡でも高い S/N が得られる。高増光率イベントは惑星シグナルを観測できる期待値も高いが、イベント自体や惑星シグナルのタイムスケールが短い。そのため、イベントが見つかった後、即時により高精度かつ高頻度な観測が行われる必要がある。

本研究では、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可視光を用いて行う MOA-II と、世界で初めて近赤外線を用いて行う PRIME の追観測を、比較的小口径の B&C(口径 61cm)望遠鏡を用いて実施するために、可視光と近赤外線を同時に観測できる装置の導入に向けた検討を行った。PRIME が検出するイベントを追観測するための近赤外線観測装置は銀河系中心方向の観測に適する南半球に少ない。また、B&C 望遠鏡は MOA-II と同じくニュージーランドに設置されており、南アフリカに設置された PRIME と経度が異なる。そのため PRIME で観測できない時間にも近赤外線による観測ができる。検討では望遠鏡に取り付けるために必要なインターフェース部分を含めた観測装置の筐体設計を CAD で行い、また観測装置が V、I、H バンドを検出仮定して限界等級のシミュレーションを行った。

ブラックホールマイクロレンズ候補イベント

gb9-2-4-380, gb1-1-0-208165, gb5-8-5-271660 の解析

山下寛介 赤外線天文学グループ (宇宙地球科学専攻)

私が所属する Microlensing Observations in Astrophysics(MOA)グループは、ニュージーランドの Mt.John 天文台に設置した口径 1.8m の MOA-II望遠鏡を用いて重力マイクロレンズ現象による太陽系外惑星、ブラックホール探査を行っている。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一時的に増光して見える現象である。レンズ天体自体の光は利用しないため、自ら光を発することのない単独で存在するブラックホールも検出することができる。恒星質量ブラックホールがレンズ天体の場合、イベントタイムスケール(t_E)が長くなり、マイクロレンズパララックス(πE)の値が小さくなると期待される。本研究ではこれらの特徴を活かし、ブラックホール探査を行った。具体的には、2006~2014年までに MOA-II によって観測された約 6000 個の重力マイクロレンズイベントの中から $t_E > 120$ 日、 $\pi E < 0.08$ (Lam et al. 2021) の閾値を満たす gb9-2-4-380, gb1-1-0-208165, gb5-8-5-271660 を選び出し、その光度曲線をモデルフィッティングして、ベイズ推定によりレンズ天体のパラメータを求めた。その結果 gb9-2-4-380 では 62.9% の確率で質量 $10.29^{+3.01}_{-2.72} (M_{\odot})$ のブラックホールという結果になり、gb5-8-5-271660 では 2 つのベストモデルのうち 1 つは、75.5% の確率で質量 $10.67^{+2.99}_{-2.96} (M_{\odot})$ のブラックホール、もう 1 つのモデルは 96% の確率で質量 $11.44^{+2.86}_{-3.20} (M_{\odot})$ のブラックホールという結果となった。

固体物質全体の磁気分離に向けた小型磁気回路の開発と性能評価

宇宙地球科学専攻 寺田研究室 陣内 創

磁気分離は異種混合粒子から目的物質を抽出・除去するための基本技術として認識されている。従来の地質学的研究においては、Fe-Ni 金属、マグネタイト、イルメナイトなどの磁性が強い鉱物の分離に用いられてきた。これに対し大多数の固体物質は弱磁性体 (i.e., 反磁性体や弱い常磁性体) であるため、誘起される磁気力は上記の物質に比べて格段に弱い。最近、小型磁気回路を用いて反磁性粒子と弱常磁性粒子の混合粒子を異なる物質群に分離できることが報告された。しかし、その分解能は地質学的研究で行われる粒子集合体の分析には十分ではなかった。本発表では、新しい磁気分離器を開発することにより、分解能が著しく向上したことを示す。その結果、磁気平行移動による粒子の分離度 X_T は約 2.5 倍に向上し、 χ の差異が $\sim 2 \times 10^7 \text{ emu/g}$ を超える 2 つの物質が確実に分離されるようになった。数値計算の結果、磁気移動距離は前述の磁力に基づく解析結果と一致した。分離の分解能の向上により磁気分離できる固体物質の数は大幅に増加し、原始隕石のマトリックス、火山灰、堆積岩などの異種地質試料の分離が可能な性能となった。未知の試料を採取した直後に、その試料の物質を特定することは、物質探査を効率的に進める上で重要なステップである。今回、作成された数値計算を標準試料の実験結果を照合することにより、その場で物質の磁性から物質の同定が速やかに行われるようになる可能性がある。今回開発された装置は、小型で消費電力が少ないため、さまざまな地質学的研究において、試料採取現場での物質分析に向けた発展が期待される。

磁気並進を利用した単一強磁性粒子の磁化測定法の開発

秋吉遥己 寺田研究室 (宇宙地球科学専攻)

自然界を構成する固体粒子にはそれぞれ固有の磁気特性がある。近年では、単一微小試料の磁気測定が、磁性材料開発、生物化学分野での応用、さらには宇宙地球科学の分野で注目されている。しかし、既存の磁気測定法によって微小なサイズの粒子を測定する場合、試料ホルダーからの background 信号の影響や、試料の質量計測の困難さにより、磁化や磁化率の測定が困難になる。これらの問題を解決する方法として、磁場空間中を浮遊する粒子の並進速度変化を用いた磁化測定法が考案された。(Kuwada et al., 2013) この方法では、磁場によって粒子にはたらく力が体積力であることから、粒子の速度変化は粒子質量に依存しない。その結果、どのような大きさの試料でも、運動速度を観測できる限りで磁化測定が可能である。また、粒子を浮遊させることにより、background 信号は生じない。

本研究では、この測定法を用いた磁化測定装置を新たに開発し、いくつかの強磁性単一粒子に対して測定を行った。具体的には、先行研究より磁場強度勾配が緩やかな磁場空間を用い、位置測定の方法を改善したことで、より小さい誤差で飽和磁化を測定することに成功した。さらに、磁場強度ごとに磁化を計算することで、ループ全体の 1/4 の範囲ながらも磁化曲線を測定することが可能となった。また開発した装置を用いて、freeze-thaw 法によって取り出された隕石中の強磁性粒子の弱い強磁性磁化を検出することに成功した。

前主系列段階における太陽活動度の制約に向けたコンドルール中短寿命放射性核種 ^{10}Be 存在度の推定

大西 亮 寺田研究室 (宇宙地球科学専攻)

短寿命放射性核種 ^{10}Be は高エネルギー粒子による核破砕反応によって生成されるため、宇宙線と物質の相互作用を探る上で良い指標となる。太陽系最古の固体物質である Ca-Al-rich Inclusion (CAI) の分析から、太陽系誕生ときに ^{10}Be が存在したことが明らかとなっている (McKeegan et al., 2000)。同時期に形成した CAI 中の $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 比にバリエーションが存在することから、初期太陽系における ^{10}Be の起源として「原始太陽活動に由来する高エネルギー粒子による核破砕反応」が有力視されている (Fukuda et al., 2021)。原始太陽の活動は、特に円盤内縁部における物質進化や円盤ガス散逸のタイムスケールを明らかにする上で重要であるため、隕石物質中の ^{10}Be 存在度から原始太陽活動度を推定する試みがなされてきた。しかし、先行研究における $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 比の決定は CAI に限られているため、円盤進化後期段階における太陽活動への制約はなされていない。CAI 以降に形成された物質の $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 比を決定することができれば、円盤進化後期段階における太陽活動度を制約できる可能性がある。

本研究では前主系列段階における太陽活動度の制約を目的とし、二次元高分解能質量分析計 (NanoSIMS) を用いた隕石中コンドルールのベリリウム-ホウ素同位体比分析を行った。難揮発性元素に富む隕石中のコンドルールに着目し、かつ分析手法の改良を行うことで、コンドルール形成当時の $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 比を初めて決定した。得られた $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 比に基づき、太陽活動度の指標となる X 線輝度を推定した。その結果、コンドルール形成当時 (CAI 形成後 ~200-300 万年) における X 線輝度は、太陽質量星の観測結果に比べて高い (~0.2 桁) ことが示唆された。本研究の結果は、円盤進化後期段階において主要なガス散逸機構として考えられている X 線照射による光蒸発 (Kunitomo et al., 2020) が、従来の理解に比べて効率良く進行していたことを示唆する。

月表面の水分子の移動に関する研究 (レビュー)

前田和輝 佐々木研究室 (宇宙地球科学専攻)

月面の揮発性物質の一部は資源として利用でき、その定量的な分布の把握は資源埋蔵量の推定に必須である。月極域の永久影領域に水などの揮発性物質が存在する可能性が 1961 年に Watson らによって示唆されたものの、その観測的証拠は長年にわたって得られなかった。1992 年のレーダー観測などによって水星極域での水氷の存在可能性が示されたことを契機とし、1998 年の中性子分光観測や 2009 年の LCROSS 衝突による分析から、月極域における水氷の観測的証拠が得られた。2020 年には SOFIA 望遠鏡による観測から中低緯度にも水の存在が示された。水の供給源の候補に、水を含む彗星や隕石の衝突、太陽風陽子とレゴリス中の酸素との化学反応、過去の火山活動などがある一方で、月表面からの昇華や微小天体衝突による攪乱などの損失過程も存在するため、長期間にわたる水の安定性には疑問がある。また中性子分光観測は月表面下 1m 程度までしか測定できないため、深部での揮発性物質の分布を知るためには異なる手法が必要である。そこで、微小天体衝突の効果を考慮した水素濃度の深さ分布の時間変化や、水分子の供給源からコールドトラップまでの水平跳躍運動を追跡する理論的推定が行われたが、地形による温度環境の複雑さや、レゴリスや空隙の不均一性、水分子の月への供給過程などが正しく考慮されていないため、その改善が今後の課題となる。また、月自転軸の歳差運動により現在の永久影領域が生じる以前に供給された揮発性物質は失われたと思われるため、月面の揮発性物質の定量化にはコールドトラップ年代測定も重要となる。

月永久影における H₂O のコールドトラップ過程の再現実験

小山 真矢 佐々木研究室 (宇宙地球科学専攻)

月面永久影領域は低温のため、H₂O が長時間凝華するコールドトラップが行われていると考えられている。H₂O の総蓄積量を推定するための H₂O の垂直移動のシミュレーション研究も多い。代表的な研究として H₂O のレゴリスへの凝華・昇華過程を深さ方向のみの 1 次元ランダムウォークに見立て、拡散過程をモデル化するものがある。このモデルでは H₂O 分子の温度を周辺レゴリス温度と仮定しているが、実際には H₂O は日照域から力学的エネルギーを持って弾道飛行で飛来するものが多く、上空から飛来してきた H₂O はすぐに凝華せずに短時間の間に何度も跳躍する可能性がある。初期タイミングで水分子が地中へ潜り込む場合、表層ガーデニングの影響を免れ、より多くの水分子を地中に保存しうるため、跳躍プロセスの解明は重要だ。水分子がエネルギーを持ちコールドトップへ入射した時に最初に形成する深さ分布の確認のため、月面を模した真空環境でレゴリス模擬ガラスビーズに H₂O を飛来させ凝華させる実験を行った。実験装置は、ガラスビーズ封入試験管と冰封入試験管、排気ポンプの 3 つからなる。ガラスビーズは液体窒素で冷やし H₂O を捕えるコールドトラップとした。冰封入試験管は管内氷の温度を制御することで H₂O 供給の水蒸気分圧を制御する。排気ポンプは水蒸気が分子流となるよう気圧を下げる。各装置はステンレス管で接続し、ステンレス管に巻きつけたヒーターにより水蒸気の温度を制御している。23°C、50°C、70°C の場合で実験を行った。H₂O を供給してガラスビーズ層にコールドトラップさせたのち、H₂O の存在深度分布を見るためガラスビーズを深度方向に 3 等分し、質量変化を測定した。結果、最表層で凝華するのではなく、数 cm の深さまで到達できるとわかった。また、自作した一次元凝華プロセスシミュレーションの深さ分布と、実験結果の比較により実験ごとのみかけ拡散係数を見積もったところ、高温粒子ほど拡散係数が大きく、深く潜り込むことも確認できた。

火星の流水地形形成における、外的流入の影響

増田清司 佐々木研究室 (宇宙地球科学専攻)

火星には水が存在したことを示唆する大規模な大洪水地形のアウトフローチャネルや、地下水流出によって表面が崩れて凹んでいるカオス地形などが存在している。これまで火星の流水地形に関する理論研究やシミュレーションは数多くされており、火星の地下構造モデルは上から地表、雪氷圏、帯水層と考えられていることが多く、それを用いて雪氷圏の厚さや帯水層の深さ、浸透率などが推定されている。シミュレーション実験は、マグマの貫入などの熱源を起因とした閉鎖的空間における熱伝導シミュレーションがほとんどである。しかしカオス地形の形成を考えるにあたり、降水や雪解け水が地表の亀裂に流入するといった非閉鎖的空間におけるシミュレーションも重要であるが、あまり議論されていない。

そこで本研究では、Python による井戸の流出シミュレーションを火星に応用し、非閉鎖的空間においてカオス地形を形成するために必要な浸透率や氷の厚さ、帯水層の深さなどを特定することを目的とした。

その結果、1 時間で 3.3mm の降水量では、帯水層の深さが 1km において氷の厚さが 10m で地表面を破壊するのに必要な浸透率は 10^{-10} m²、氷の厚さが 30, 50, 100, 150m で浸透率は 10^{-11} m²、氷の厚さが 200m で浸透率は 10^{-12} m² 以下であることがわかった。また、帯水層が深くなるにつれてこの浸透率は小さくなり、地表面を破壊しうる浸透率を指数曲線で近似してその境界線をみると、流入量や亀裂の大きさに比例することもわかった。

また本研究では、得られた結果と浸透率に関する先行研究の比較を通して帯水層の深さや氷の厚さ、必要な流入量の再検討を行った。さらに、地下水の流出を自由噴流とみなしてべ

ルヌーイの定理を適用し、アウトフローチャンネルを形成するのに必要な流速の考察も行った。最後に、火星の流水地形形成における本圧力シミュレーションモデルの実用性を検証した。

地球型惑星のマグマオーシャンの進化の軌跡（レビュー）

高橋 明寛 佐々木研究室（宇宙地球科学専攻）

様々な理論と観測から地球型惑星やその前段階の原始惑星において、巨大衝突、放射性元素の崩壊、核形成などによるケイ酸塩マントル・マグマオーシャンの存在が示唆されている。

巨大衝突に伴うエネルギーは、地球集積時に全球規模のマグマオーシャンを生成するのに十分な大きさである。しかし、地球ではマグマオーシャンを必要とする化学的証拠は乏しく、マグマオーシャンの化学的証拠を地殻の循環とマントルの混合を繰り返してきた現在の地球のマントルから見つけるのは難しい。一方で、月や火星、隕石などの地球型惑星の物質からは、それぞれにおけるマグマオーシャンの可能性が示唆されている。大規模な融解とマグマオーシャン形成の可能性を引き起こすプロセスは、巨大衝突だけではない。初期の惑星形成モデル、惑星の成長については多くの議論がされてきた。マントルが凝固し、液体の水が存在する温暖な表面状態になるまでの時間は、成長する原始大気を通した惑星表面からの熱流束に大きく依存する。また、集積エネルギーによって大きく融解した地球型惑星では、マグマオーシャンの結晶化によって不安定な堆積成層が形成され、安定な成層、初期の玄武岩質地殻と分化したマントル層が形成されるまでに、複数回の密度逆転に伴うオーバーターンが起きた可能性がある。このような原始大気やケイ酸塩・金属の分化、密度逆転といった要素は、初期形成から現在までの惑星の進化に重要な影響を与えたと考えられている。

したがって、マグマオーシャンの形成と凝固の過程は、地球型惑星の初期組成分化と揮発性物質に強く影響される。本論では、地球型惑星におけるマグマオーシャンの証拠と、集積・巨大衝突などのエネルギー、マグマオーシャンにおける組成分化、揮発性物質の分布と脱ガス、冷却・凝固の過程に関する研究に焦点を当てて、現在のマントル・マグマオーシャンの進化について紹介する。

MgSO₄-H₂O 系の高圧下相境界決定

片本 尚吾 近藤研究室（宇宙地球科学専攻）

木星や土星の氷衛星では近年の探査機の観測結果などから内部海の存在が示唆されている。内部海の詳しい構造や進化過程を推測する上で、塩を含む系が圧力下においてどのように振る舞うのかを理解することは重要であるが、生成される水和物や相図への影響など、まだ明らかになっていない点も多い。エウロパなどで想定される MgSO₄-H₂O 二成分系の相関係の研究では、加圧中の過剰圧の発生や出発試料の濃度の不確実性などのいくつかの実験上の問題が存在し、正しい相関係が得られていない。本研究では、これらの問題に対してダイヤモンドアンビルセルを用いた実験手法の改善を試みた。特に氷天体進化過程の後期で重要となるにも関わらず、不確定の多い共晶点より高濃度領域の相関係に着目し、初期濃度保持の改善や、振動による核形成の促進などの効果を検証すべく、高圧力下における結晶生成の様子を光学観察で同定を行い、二成分系での濃度・圧力に対する相図を再検討した。本手法は他の塩類を含む水溶液の圧力下における相関係を実験的に研究する場合にも応用が期待できる。

GHz-DAC 音速測定法の開発：下部マントル鉱物の弾性測定に向けて

加藤 拓人 近藤研究室（宇宙地球科学専攻）

地球内部は地震波速度構造として調べられており、そこから地球深部を構成する物質を知るためには、高温・高圧下における構成物質の音速データが重要である。特に、地球下部マントルは低速度領域など特徴的な領域の存在が地震波観測から確認されており、その原因を明らかにするためにも下部マントル条件の温度圧力における音速測定が必要である。また、地球深部の圧力はダイヤモンドアンビルセル(DAC)で発生可能である。GHz-DAC 音速測定法(GHz 法)は DAC 中の試料に GHz 帯の周波数を持つ波長の短い弾性波を伝搬させることで、 $\sim 10 \mu\text{m}$ 厚みの試料の音速測定ができる。本手法は、よく用いられる他の手法と比較して鉄等の不透明試料の縦波速度・横波速度 (V_P & V_S) の両方をラボ内で測定できるという特徴を持つ。しかし、測定技術の難しさから、測定実績のある温度圧力範囲が他の手法に比べて狭い。そこで、我々は下部マントル鉱物の弾性測定を目指して GHz 法の手法開発、特に高圧拡張を行った。同時に、フェロペリクレース(Mg,Fe)O 中の鉄スピン転移に伴う弾性異常の検出を目指した。フェロペリクレースは下部マントルで二番目に多く分布する鉱物で、下部マントルにおいてスピン転移がどれほど地震波速度に影響を与えるかは先行研究内でも矛盾点がある。まず、GHz 法の信頼性を確認するためにフェロペリクレースの端成分であるペリクレース MgO を用いたテスト測定を行い、先行研究と調和的な結果が得られたことを確認した。その後 32 GPa でフェロペリクレースの音速測定を行った。そして、さらなる高圧下では試料セットアップ等でさらなる工夫と開発が必要になることが分かった。

天体衝突による鉄合金の変形初期温度依存性

神垣 遼 近藤研究室（宇宙地球科学専攻）

宇宙空間での天体の衝突現象は、惑星の形成・進化の素過程の一つとして宇宙地球科学の分野において重要な研究対象であり、衝突の際、天体の破片として放出される隕石中には様々な衝撃変成組織が発見されている。衝突現象の理解のために、隕石中に見られる様々な衝撃変成の評価が行われており、その中の一つに、衝撃圧力の推定を、衝撃圧縮時の鉄合金の変形や溶融に着目して行ったものがある[1]。結果から衝撃圧縮に伴う鉄合金の扁平が衝撃圧力を表す指標になりうるということが示された。しかし数値シミュレーションの結果などから隕石の母天体内部は高温状態であったことが推測されているにもかかわらず、この実験では鉄合金の変形に影響を与えると考えられる初期温度を変化させての実験は行われていない。そこで本研究では、試料を高温にした状態で衝撃回収実験を行えるようなセルの設計・開発を行い、未分化天体を模擬した試料に対して、レーザーによる衝撃回収実験を行うことにより、鉄合金の変形と初期温度の関係を調べた。

本研究では、 $\leq 10\text{GPa}$ の圧力範囲において、初期温度を 300K、700K、1000K と変化させて実験を行った。回収試料の観察・解析の結果、初期温度 700K、1000K のものについては、比較的低い圧力での実験だったにもかかわらず、ケイ酸塩鉱物や鉄合金の溶融が確認されたものの、鉄合金のアスペクト比の平均値に影響を与えるほど大規模なものではなかった。また今回の圧力範囲においては鉄合金の扁平自体は確認されたものの、鉄合金の扁平と初期温度の間に相関は確認されなかった。

[1] Hirata et al., *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 174 (2009) 227–241

地球の核—マントル境界における水と鉄の交換反応

河野 克俊 惑星内部物質学研究室 (宇宙地球科学専攻)

地球の核—マントル境界は固体ケイ酸塩鉱物からなるマントルと液体鉄からなる核が高温高圧下で接する化学的不連続面である。近年の地震学的研究により、核—マントル境界のマントル側には密度が高く、地震波の遅い地震波超低速度領域(以下、ULVZ)が局所的に存在することが知られている。ULVZ の地震学的特徴は化学反応による核からマントルへの鉄の移動が起こるなら説明可能である。しかし、ブリッジマナイト内における鉄の遅い拡散速度では、ULVZ の形成する距離の鉄の移動が起こらないことが指摘されている。そこで本研究では、マントルにも少量存在している「水」が持つ化学反応を促進する性質に着目し、高温高圧反応実験を通じて鉄—ケイ酸塩鉱物間の化学反応に少量の水が与える影響を調べた。実験には、マルチアンビル装置(ORANGE-3000,GRC) を利用し約 0.45 wt.%の H₂O 成分を含んだブリッジマナイト多結晶体と Fe および FeNi 合金を層状に配置したサンプルを用いた。すべての実験において鉄とブリッジマナイトの境界面に (Fe,Mg)O フェロペリクレスに富んだ反応帯の形成が確認された。反応帯の厚さは試料に含まれる水の総量に依存し増加した。反応帯は(1) 鉱物中の H₂O 成分と鉄との間で起こる化学反応(H₂O+3Fe→2FeH+FeO)と、(2)鉄成分の鉱物間における分配 (FeO+MgSiO₃=(Fe,Mg)O+(Fe,Mg)SiO₃)により説明可能である。つまり、水成分の影響でフェロペリクレスが出現したと言える。これにより、ブリッジマナイトに富んだ環境では起こらない鉄の高速拡散が実現し、無水条件の先行研究では見られなかった反応帯が形成されたと考えられる。実際のマントル温度圧力条件下においても、フェロペリクレス内の鉄の拡散速度を考量すると ULVZ の厚さの反応帯を形成することが可能である。また、ULVZ の密度、P 波速度、S 波速度は上記反応に水が 1.5×10²⁰ kg 関与した場合に説明可能であることが明らかとなった。

宇宙地球科学専攻

会場：D303

2月14日（水）

周期駆動された電荷密度波における同期現象

舟見 優 波多野研究室 (宇宙地球科学専攻)

電荷密度波(Charge Density Wave : CDW)は電子密度が空間的な周期構造を示す秩序構造である[1]。通常、CDW は不純物などにより固定(ピン止め)されて動かない。しかし、CDW は電子の凝縮体であるため外部電場による駆動が可能であり、閾値以上の直流電場を印加することで並進運動(スライディング)を行うことが知られている。この CDW の運動は摩擦現象と類似しており、静止している CDW に働くピン止め力は静止摩擦力に対応しているといえる。CDW スライディングで運ばれる電流は、ピン止め効果により非線形な電気伝導を示し、特に興味深いのは、直流電場に加えて交流電場を印加したときに生じる同期現象である。この同期現象は CDW の電流-電圧特性の階段構造(シャピロステップ)として現れる。

最近、代表的な CDW 物質である NbSe₃ のスライディング現象に対して、基板に表面弾性波を印加した実験が行われるようになってきた。そこでは交流電場を印加せずとも、表面弾性波によってシャピロステップが現れることが報告されている[2]。このような新展開を踏まえ、本研究では、CDW ダイナミクスの標準理論である Fukuyama-Lee-Rice モデルに表面弾性波の効果を取り入れた理論解析を行なった。その結果、シャピロステップのステップ幅の弾性波振幅依存性やフラクタル性など、同期現象の諸性質が交流電場の場合と異なることが明らかとなった[3]。発表では、関連する別の実験[4]に触発されて行なった、外部周波数を 2 種類混ぜた場合の同期現象についても触れる予定である。

[1] P. Monceau, *Adv. Phys.* **61**, 325 (2012).

[2] K. Fujiwara, Y. Niimi *et al.*, private communication.

[3] Y. Funami and K. Aoyama, *PRB* **108**, L100508 (2023).

[4] S. A. Nikonov *et al.*, *APL*. **118**, 253108 (2021).

分子動力学法による気液界面の粒子の運動の分析

東 佑貴 波多野研究室 (宇宙地球科学専攻)

2 相共存系は熱力学的な対象として研究されてきた。近年では、マイクロ・ナノスケールで界面を観察・測定することが可能になった。具体例として液液界面では油中水滴、固液界面では細胞間隙や細胞内膜間隙、気液界面ではナノバブル、ナノドロプレットなど様々な対象が存在する。また、計算資源の増加により分子動力学法によって 2 相共存系を直接数値計算することが可能になったため、個々の粒子を追跡するなど気液界面のミクロな特性を調べられるようになった。一方で気液界面については具体例で挙げたような応用的な興味から研究されることが多く、曲率を持つ気液界面の粒子の運動は調べられていない。

本研究では、2 相共存系の中から気液界面に着目し、分子動力学法を用いて界面が様々な曲率を持つ系を作成し、気液界面に存在する粒子の運動を分析する。気液界面を定義し界面領域にいる粒子を対象にして、平均二乗変位・生存確率を調べた。平均二乗変位は領域に制限された方向と界面の表面方向の 2 パターンを分析し、バルクと比較して両パターンにおいて拡散が早く、曲率による効果は曲率が正の場合は確認できた。生存確率はワイブル分布によってフィッティングできることがわかった。また、生存確率はバルクと比較して小さく、曲率が大きくなると小さくなる。

合金微細構造形成の冷却速度依存性

島田 顕生 波多野研究室 (宇宙地球科学専攻)

合金には、その成分や結晶構造のなす相の分離により Widmanstätten 模様などで知られる微細構造が生じる。こうした構造は温度や外的応力など幾つかの物理量により変化する。とりわけ、系が高温から低温に変化する中で構造形成が進む場合、その温度変化の速度によって最終的な構造に違いがもたらされること (構造の冷却速度依存性) が少なからず報告されている。既存の研究においては、特定の合金組成に対して、その合金の剛性などの物性を解明するために実験や数値計算に基づき冷却速度依存性が調べられてきた。一方で、特定の組成に依存しない冷却した場合の一般的な性質については調べられてこなかった。

そこで、研究においては物質の化学的な量に依拠しない自由エネルギーモデルを用いた数値計算を冷却速度ごとに行い、得られた構造の幾何学的な特徴を見出すことにした。文献 [1] の等温条件でのモデルをもとに温度変化に対応する形で修正したモデルを用意した。そして、冷却方法や数値計算方法を工夫して計算を進めた。

数値計算の結果、具体的な組成に依存しないモデルにおいても冷却速度によって構造の違いが現れることが確認された。この違いを特徴付ける量として構造中に生じるクラスター面積を計算し、その分布を解析すると、冷却速度によって違いが現れることが確認された。そして、こうした冷却速度ごとの違いを初期状態や弾性エネルギーの効果の有無といった条件を変えた場合について調べていくと、条件によって冷却速度ごとの違いの出やすさに変化が生じることも確かめられた。

[1] C. Sagui et al., *Phys. Rev. E* **50**, 4865 (1994). doi:10.1103/PhysRevE.50.4865

スプリングネットワークモデルを用いた複合材料の破壊過程の解析

野口 遥佳 波多野研究室 (宇宙地球科学専攻)

近年、複合材料の破壊過程が注目を集めている。例えば、セラミックスなどは典型的な脆性材料であるが、ケイ素(SiO)からなる繊維などで内部構造を導入し強化することで、破壊挙動が脆性的なものから延性的なものへと変化することが知られている。複合によって生じる破壊様式の変化を理解するのは、破壊現象の基礎的な理解に役立つだけでなく、破壊強度の高い物質を創造するというマテリアルデザインの観点からも重要である。

本研究では、複合材料の破壊挙動を調べるため、破壊現象の確率モデルの一つであるスプリング・ネットワークモデルを用いて準静的な引っ張り破壊の数値解析を行った。スプリング・ネットワークモデルとは、割り振られた破壊しきい値を超えたバネが切れると考えることで破壊現象を表現するモデルである。繊維強化セラミックスなど、異なる強度を持つ物質の複合をモデル化するため、壊れるバネと壊れないバネの2種類をモデルに導入した。壊れないバネを用いて系に内部構造を導入し、破壊挙動を比較した。解析の結果、内部構造を導入することで破壊挙動が脆性的なものから延性的なものに変化することが分かった。また、亀裂のサイズ分布、破壊イベントの分布を解析した結果、内部構造の長さスケールを用いたスケールリングが成立することが分かった。

Simulation study of period change behavior of LFEs based on fault patch model

Ma Fang 波多野研究室 (宇宙地球科学専攻)

A wide range of earthquakes have been observed in worldwide subduction zones, such as Nankai trough, where the slow earthquakes were found originally in the 20th century. In recent years, there are more and more evidences that show the earthquakes recurrence histories may provide clues to the prediction of the future event. The intervals between two large events are not well known because large earthquakes are infrequent. However, for small earthquakes, such as low frequency earthquakes, recurrence intervals are more quantifiable than large events.

At San Andreas fault, the tectonic tremor sequence that last 8.5 years has been documented with alternating repeat times, which show that the recurrence intervals oscillated between 3 and 6 days.

In this study, I adopt a fault patch model, which focuses on a small region on a fault plane that moves at a constant velocity. I try to explain the period-oscillation behavior of LFEs. The rate- and -state law and the slip law are adopted as a friction law on the earthquake fault. In addition, the influence of the variable fluid pressure is implemented to the model. I discuss the relation between the simulation data and the observation data. I evaluate the influence of the parameters, such as the elastic coefficient k , the relaxation time τ , and the dependence of fluid pressure on slip velocity.

中心天体へのガス降着に乱流が与える影響の調査

西田 海斗 長峯研究室 (宇宙地球科学専攻)

乱流は銀河系内に普遍的に存在し、天体形成の根幹をなす現象である。天体形成過程では、乱流による角運動量の輸送が重要な役割を果たし、中心天体へのガス降着と円盤形成に深く関連している。これにより、中心天体への物質の流入が制御されることから、星や惑星、ブラックホールの形成過程を理解する上で乱流ガスの降着を理解することは重要である。しかし、乱流が降着現象へ与える影響について体系的な研究は未だ十分ではない。

乱流ガスの降着プロセスを体系的に理解するために、我々は乱流の性質を変化させた一連の3次元流体シミュレーションを実施した。これらのシミュレーションでは、乱流のスケール、速度、およびソレノイダル比（回転成分と圧縮成分の比率）を変化させた。乱流の効果に着目するため、一様な密度と温度を持つガスからの球対称降着に、速度の摂動を伴う乱流を導入するというシンプルなモデルを採用した。

結果として、乱流の性質に依存して、質量降着率が球対称 Bondi 降着と比較して大きく低下するモデルと低下しないモデルがあることを確かめた。乱流サイズが大きく乱流のソレノイダル比が大きいほど質量降着率が低く抑えられる傾向があり、球対称 Bondi 降着と比べて質量降着率が最大で1桁程度低下するものがあつた。この原因として、大スケールの乱流による Bondi – Hoyle – Lyttleton (BHL) 型の降着現象が挙げられる。BHL 降着は、風を受けるように中心天体がガスを獲得する降着現象で、球対称降着と比較して質量降着率は低下する。

このように、乱流の性質がガス降着に無視できない影響を与えることを示した。

機械学習を用いた大質量・小質量 X 線連星の分類

山田知也 長峯研究室 (宇宙地球科学専攻)

X 線連星とはコンパクト天体と恒星天体 (伴星) の近接連星系であり、伴星からの質量降着によって X 線を放射する天体である。伴星の質量に注目することによって、X 線連星は大質量 X 線連星 (HMXB) と低質量 X 線連星 (LMXB) に分類される。現在、これら二種類の X 線連星は、伴星の可視光観測によるスペクトル型や質量の推定から分類されている。しかし、数 Mpc を超える距離に存在する遠方の系外 X 線連星では、可視光観測の空間解像度の限界から分類できていないのが現状である。

本研究では、可視光の観測に頼らない分類方法を開発するために、X 線観測の情報のみを使用して X 線連星を分類する機械学習モデルを構築した。訓練データとして天の川銀河、および近傍銀河に属する、可視光観測から HMXB と LMXB の分類が行われている X 線連星を用いた。学習の結果、近傍 X 線連星を最高 87% の精度で分類できるモデルの構築に成功した。天の川銀河では 58% が HMXB を占める。そのモデルを用いて遠方 X 線連星を分類したところ、73% の XRB が HMXB であるという結果が得られた。この結果は HMXB が銀河の星形成率をトレースするという従来の知見と矛盾していない。また、HMXB と LMXB に分けて系外銀河の X 線光度関数を作成した結果、両者は光度依存性が異なることを発見した。

ホーキング放射を用いた原始ブラックホール存在量への制限

柳澤 馨 長峯研究室 (宇宙地球科学専攻)

暗黒物質は宇宙の構造形成に大きく関わり、その正体の究明は宇宙物理学における最重要課題の一つである。素粒子理論からの候補としては、**Weakly Interacting Massive Particles** が挙げられているものの、検出には至っていない。素粒子理論からの候補粒子が見つからない中で、重力波の検出に関連して、宇宙初期に形成された原始ブラックホールが暗黒物質の候補として注目を集めつつある。しかし、原始ブラックホールの質量は 10^{14} g から 10^{55} g の幅広い範囲をとり、様々な手法で暗黒物質としての存在量に対する制限が課されている。

10^{17} g 以下の原始ブラックホールは、ホーキング放射を通して MeV-GeV 程度の光子やニュートリノを放出しながら蒸発する。我々はガンマ線観測の最新データと蒸発過程を比較することで、 10^{15} g から 10^{17} g の原始ブラックホールの存在量に新たな制限を課すことに成功した。また、将来の MeV ニュートリノ実験・MeV ガンマ線実験である **HyperKamiokande** や **GRAMS** による超新星ニュートリノ背景放射観測から、期待される原始ブラックホールへの制限の予想も行った。

粒子シミュレーションを用いた磁気渦加速と無衝突衝撃波加速による 2段階加速の研究

花野 正浩 レーザー宇宙物理学グループ(宇宙地球科学専攻)

宇宙から地上へと降り注ぐ高エネルギーの荷電粒子である「宇宙線」の生成機構として、無衝突衝撃波による加速が有力視されている。近年のレーザー技術の発展により、高強度レーザーとプラズマの相互作用によって無衝突静電衝撃波の生成と衝撃波面のポテンシャルによるイオンの反射・加速 (Collisionless Shock electrostatic Acceleration: CSA) が可能となった。一方、シミュレーションを用いることで、実験では計測することが困難なパラメータを解析することができる。我々は、シミュレーションと実験から、無衝突衝撃波によるイオン加速の素過程を調べ宇宙線生成機構の解明への寄与を目指している。

本研究では、Particle-In-Cell (PIC) シミュレーションで過去に行われた CSA 実験を再現し、CH (C^{6+} , proton) で構成された多成分プラズマにおいて、磁気渦加速 (Magnetic Vortex Acceleration: MVA) と CSA という異なる加速機構による2段階加速によってイオンが加速されていることを示す。また、生成された衝撃波が磁気渦によってプラズマ中に生成された磁場によって駆動されていることが明らかになった。さらに、プラズマの厚さ、照射レーザーの偏光方向、プラズマのイオン種 (2成分と単成分)、プラズマの初期密度や分布を変えてイオン加速条件の最適化を行った。

GRAMS 実験に向けた液体アルゴンコンプトンカメラ用 電離電子読み出しシステムの開発

石渡 幸太 松本研究室 (宇宙地球科学専攻)

Gamma-Ray and AntiMatter Survey (GRAMS) 計画は、大型の液体アルゴン放射線検出器を飛翔体に搭載することで、MeV ガンマ線天文学の開拓と低エネルギー重陽子検出による間接的な暗黒物質探査を目的とした日米共同の国際計画である。ガンマ線イメージングでは、入射ガンマ線と検出器の散乱・吸収体の相互作用(コンプトン散乱・光電吸収)の情報を再構成することで入射ガンマ線の分光撮像を可能にするコンプトンカメラという手法を用いている。GRAMS 計画では散乱・吸収体に液体アルゴンを採用した Liquid Argon Time Projection Chamber (LArTPC) をコンプトンカメラとして運用することで MeV ガンマ線帯域での大有効面積実現を目標としている。LArTPC は近年、素粒子物理学実験の分野で実用化されているが、コンプトンカメラとして機能させた実績はこれまでにない。そこで我々はガンマ線イメージングの実証を目的とした小型 (有感領域 $5 \times 5 \times 10$ cm) の LArTPC を構築し、電離電子の読み出し系やシンチレーション光検出器を新規に開発した。電離電子の読み出しには 3.2×3.2 mm のピクセルに分割された合計 256ch のアノードパッドと、半導体検出器用の低ノイズ・低消費電力な読み出し集積回路を用いている。また光検出器には液体アルゴン温度 (87 K) で動作し低ノイズかつ高速応答を実現する浜松ホトニクス社製の 16ch SiPM アレイを採用した。本研究では、これら電離電子読み出し系と光検出器系の動作確認と性能評価のため、ガスアルゴンとアルファ線源を用いた試験を実施した。その結果、期待されるアルファ線のイベントレートと同程度のレートで飛跡状イベントを取得することに成功した。さらにエネルギー較正を行い、求めた Energy deposit の平均値が 1.5 MeV であり、これはモンテカルロシミュレーションの結果と整合的である。本修士論文の研究により、液体アルゴンコンプトンカメラ実証機の電離電子読み出し系と光検出器系を確立した。

低プラズマベータ領域におけるレーザー駆動磁気リコネクション実験

鈴木 悠斗 レーザー宇宙物理学グループ (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がり変わり幾何学的な形状の変化を起こす現象であり、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。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、太陽からの高エネルギー粒子や宇宙線の加速機構の一つと考えられている。磁気リコネクションについて、天体観測や観測衛星、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行われてきた。近年、高出力・高強度の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、磁気リコネクションによる粒子加速の物理機構を解明すべく、強磁場生成が可能なレーザー駆動コイルターゲットを採用し、磁気リコネクション実験を行った。大阪大学レーザー科学研究所の高出力激光 XII 号レーザーを、上下に配置した一対のコイルターゲットに照射することでコイル間に反平行磁場を生成し、プラズマベータ値(プラズマの圧力と磁場の圧力の比)が1以下の領域において磁気リコネクションを駆動した。計測は、高強度 LFEX レーザーで生成されたプロトンを用いたバックライト計測と磁気プローブによる磁場計測、YAG レーザーと ICCD カメラ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(電子密度・電子温度・フロー速度・イオン温度)計測、電子スペクトロメータを用いた電子エネルギースペクトル計測、ICCD カメラを用いたプラズマからの自発光の空間分布計測を行った。

XRISM 衛星搭載 Xtend における CCD 受光部外からの電荷侵入事象の研究

青柳美緒 松本研究室 (宇宙地球科学専攻)

我々は、日本で7番目のX線天文衛星XRISMに搭載する軟X線撮像装置XtendのX線CCDカメラ(SXI)の開発を行ってきた。開発途中の2021年2月にCCD素子と検出器構体、電子基板、冷凍機のフライト品を組み合わせた冷却試験を実施した際、原因不明の電荷がCCD受光部外部で発生し、内部へと侵入する異常事象が発生した。これが軌道上で発生すると、撮像分光性能に大きな影響を与える。

この事象の対策を確立し原因を究明するため、2021-2022年に大阪大学にてSX1とほぼ同等の素子を用いて3種類のセットアップで異常事象の再現に成功した。その結果、CCDの受光部外で発生した電荷が、分光性能を保つための人工電荷注入用電極周辺から侵入してくることを突き止めた。我々は軌道上で本事象が発生した場合の対策法として、人工電荷注入のためのポテンシャル構造を時間変化させて電荷侵入を防ぎつつ分光性能を保つ新たなCCD駆動法を考案した。そして2022年8月にJAXA筑波宇宙センターで実施した軌道上環境を模擬した衛星試験において、フライト形態のSX1で較正用線源 ^{55}Fe からの $\text{Mn-K}\alpha$ 輝線を用いて新駆動法の分光性能(FWHM)を評価した結果、180 eV程度で打ち上げに必要な性能(<200 eV)を保っていた。並行して、本事象の原因究明も大阪大学の実験室にて進め、CCD内部の様々なポテンシャル構造を変化させながら異常の度合いの変化を測定し、電荷侵入事象が急激に増大するCCD内部のポテンシャル構造を明らかにした。

本研究によって万が一軌道上で異常電荷事象が発生したとしても、新CCD駆動法で撮像分光性能が保てる見込みが得られ2023年9月7日にXRISMは種子島宇宙センターより打ち上げられた。軌道上でSX1を立ち上げ、画像を調べたところ、電荷侵入事象は発生しておらず期待通りの性能で天体の撮像にも成功した。

