

2020 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3年2月9日(火)・10日(水)

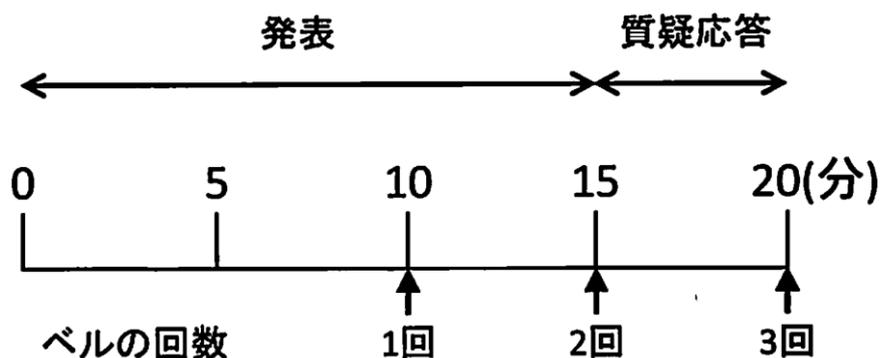
目次

● 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9日)	9
・ 物理学専攻 素粒子・原子核グループ (2月10日)	19
・ 物理学専攻 物性グループ (2月9日)	26
・ 物理学専攻 物性グループ (2月10日)	36
・ 宇宙地球科学専攻 (2月9日)	44
・ 宇宙地球科学専攻 (2月10日)	53

[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(水) 16:00～

会場：D303

※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9日(火)、10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9日(火)の最後のタイムキーパーの方へ
9日(火)の発表会終了後、10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を紙袋に入れて渡してください。
- 2月10日(水)の最後のタイムキーパーの方へ
10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(越野研) :
河本京也、玉置弦 (Ext. 5736)
- 宇宙地球科学専攻(長峯研) :
大西一慶、寺口遼

素粒子・原子核グループ(会場:H701)

2月9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
橋本	9:00	伊賀 友輝	川畑 貴裕	10		吉田	川畑	青木		山本(川畑研)
	9:20	坂梨 公亮	川畑 貴裕	10	○	川畑	青井	小田原		
	9:40	前島 大樹	川畑 貴裕	11		小田原	川畑	阪口		
	休憩									
青木	10:20	柴田 海輝	兼村 晋哉	11		兼村	尾田	柳生		小淵(素論研)
	10:40	芝野 敦子	兼村 晋哉	12		兼村	尾田	田中 実		
	11:00	下田 誠	兼村 晋哉	12	○	兼村	大野木	柳生		
	11:20	小出 真嵩	大野木 哲也	13	○	大野木	橋本	山口		
	11:40	西川 航平	大野木 哲也	13	○	大野木	兼村	飯塚		
	休憩									
浅川	13:00	青木 匠門	橋本 幸士	14	○	橋本	大野木	深谷		原(素論研)
	13:20	姉川 尊徳	橋本 幸士	14	○	橋本	兼村	飯塚		
	13:40	片山 兼渡	橋本 幸士	15	○	橋本	兼村	尾田		
	14:00	名古屋 雄大	橋本 幸士	15	○	橋本	大野木	山口		
	14:20	毛受 正裕	橋本 幸士	16		橋本	山口	飯塚		
	休憩									
川畑	15:00	肥後本 拓也	浅川 正之	16		浅川	萩原	保坂		田中(浅川研)
	15:20	伊藤 広晃	浅川 正之	17	○	浅川	橋本	尾田		
	15:40	大島 涼介	浅川 正之	17		浅川	大野木	石井		
	16:00	西村 透	浅川 正之	18	○	浅川	黒木	野海		

素粒子・原子核グループ(会場:H701)

2月10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
山中	9:40	嶽村 真緒	藤岡 慎介	20		藤岡	能町	有川		木村(川畑研)
	10:00	滝沢 龍之介	藤岡 慎介	20	○	藤岡	川畑	有川		
	休憩									
藤岡	10:40	森 浩睦	民井 淳	21	○	青井	川畑	民井		吉田(中野研)
	11:00	近藤 亮太	嶋 達志	21	○	青井	青木	嶋		
	11:20	中井 創	嶋 達志	22	○	青井	青木	嶋		
	休憩									
青井	12:40	大本 恭平	福田 光宏	22		福田光宏	青木	依田		岩田(山中研)
	13:00	WICKREMASINGHE LAKMIN	山中 卓	23	○	山中 卓	青木	南條		
	13:20	白石 諒太	山中 卓	23	○	山中 卓	青木	南條		
	13:40	乃一 雄也	山中 卓	24		山中 卓	中野	吉田		
	休憩									
中野	14:20	佐藤 良紀	青木 正治	24		青木	能町	南條		杉田(青木研)
	14:40	SUN SI YUAN	青木 正治	25	○	青木	山中 卓	吉田		

16:00

判定会議: D303

(教授, 准教授, 講師, 及び審査委員の助教 全員出席)

物性グループ(会場:D303)

2月9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
松野	9:20	伊藤 優汰	宮坂 茂樹	27		宮坂	工藤	木村		片山(工藤研)
	9:40	妹尾 祐輝	宮坂 茂樹	27		宮坂	花咲	中島		
	10:00	山本 俊樹	宮坂 茂樹	28		宮坂	工藤	黒木		
	10:20	吉野 健太郎	宮坂 茂樹	28		宮坂	工藤	酒井		
		休憩								
工藤	11:00	川畑 宇矢	花咲 徳亮	29		花咲	酒井	中澤康浩(化学)		小田(花咲研)
	11:20	中岡 優大	花咲 徳亮	29		花咲	萩原	村川		
	11:40	真栄城 竜生	花咲 徳亮	30		花咲	酒井	新見		
		休憩								
豊田	13:00	高橋 真夏	菊池 誠	30		吉野	菊池	阿久津		堀(松野研)
	13:20	長澤 莉希	菊池 誠	31		吉野	菊池	波多野(宇宙)		
	13:40	大河内 真哉	松野 丈夫	31		松野	宮坂	上田		
	14:00	福島 健太	松野 丈夫	32		松野	新見	上田		
	14:20	森内 直輝	松野 丈夫	32		松野	萩原	上田		
		休憩								
杉山	15:00	川畑 太嗣	木村 真一	33		木村	豊田	渡辺純二		村上(豊田研)
	15:20	柴田 友里亜	木村 真一	33		木村	宮坂	渡邊 浩		
	15:40	飛鳥 樹喜	木村 真一	34		木村	兼松	渡邊 浩		
		休憩								
木村	16:20	西井 健剛	萩原 政幸	34		萩原	杉山	鳴海		菊田(萩原研)
	16:40	二本木 克旭	萩原 政幸	35	○	萩原	松野	鳴海	木田	
	17:00	松崎 大亮	萩原 政幸	35		鳴海	萩原	工藤		

物性グループ(会場:D303)

2月10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
黒木	9:20	太田 智陽	小林 研介	37	○	小林	工藤	松野	新見	佐々木(小林研)
	9:40	坂井 康介	小林 研介	37		新見	小林	松野		
	10:00	花田 尚輝	小林 研介	38		新見	小林	越野		
	10:20	藤原 聖士	小林 研介	38		新見	小林	大岩		
	10:40	渡邊 杜	小林 研介	39	○	小林	花咲	松野	新見	
		休憩								
花咲	11:20	中辻 直斗	越野 幹人	39	○	越野	浅野	松野		渡邊(黒木研)
	11:40	人見 将	越野 幹人	40	○	越野	黒木	新見		
	12:00	北峯 尚也	黒木 和彦	40		黒木	工藤	Slevin		
	12:20	山崎 公裕	黒木 和彦	41	○	黒木	越野	宮坂		
		休憩								
宮坂	14:00	宮前 陽充	浅野 建一	41		浅野	阿久津	越野		林(千徳研)
	14:20	高木 悠司	千徳 靖彦	42	○	千徳	越野	岩田		
	14:40	巽 悠輔	千徳 靖彦	42		千徳	小川	佐野		
	15:00	柳谷 諭	大岩 顕	43		大岩	松野	長谷川		

16:00

判定会議:D303

(教授, 准教授, 講師, 及び審査委員の助教 全員出席)

宇宙地球科学専攻(会場:D403)

2月 9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
長峯	9:20	土井 惇司	近藤 忠	45		近藤	佐々木	谷口			三浦 巧(近藤研)
	9:40	松井 俊樹	佐々木 晶	45		佐伯	佐々木	近藤			
	10:00	松岡 夏季	佐々木 晶	46		佐々木	近藤	佐伯			
	10:20	荒木 亮太郎	佐々木 晶	46	○	佐々木	寺田	佐伯			
	休憩										
松本	11:00	坂本 龍之輔 (他大学院生)		47	○	波多野	桂木	佐々木	廣野	湯川	寺口 遼(長峯研)
	11:20	島村 優太郎	桂木 洋光	47		廣野	桂木	久富			
	11:40	山下 修平	桂木 洋光	48		廣野	桂木	久富			
	12:00	中島 碩士	桂木 洋光	48		久富	桂木	兼松(物理)			
	休憩										
佐々木	13:20	桐川 凜太郎	住 貴宏	49	○	住	長峯	井上			門野 創一(住研)
	13:40	小路 ひかる	住 貴宏	49		住	長峯	井上			
	14:00	田中 謙	住 貴宏	50		住	松本	林田			
	14:20	山脇 翼	住 貴宏	50		住	松本	林田			
	休憩										
住	15:00	山田 幸子	佐々木 晶	51		佐々木	桂木	波多野			有田 直哉(佐々木研)
	15:20	島名 亮太	佐々木 晶	51		佐々木	佐伯	横田			
	15:40	今井田 奈波	佐々木 晶	52		佐々木	桂木	佐伯			
	16:00	谷口 翔一	佐々木 晶	52		大高	佐々木	佐伯			

宇宙地球科学専攻(会場:D403)

2月 10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
桂木	9:20	奥 裕理	長峯 健太郎	54	○	長峯	松本	井上			岩垣 恵太(桂木研)
	9:40	福島 啓太	長峯 健太郎	54	○	長峯	住	井上			
	10:00	出口 雅樹	寺田 健太郎	55		横田	佐々木	植田			
	休憩										
波多野	10:40	中川 義治	中井 光男	55		中井	松本	坂和			峯田 大靖(松本研)
	11:00	石倉 彩美	松本 浩典	56		林田	松本	住			
	11:20	佐久間 翔太郎	松本 浩典	56		林田	松本	能町(物理)			
	休憩										
近藤	12:40	服部 兼吾	松本 浩典	57		松本	林田	井上			松本 匡能(寺田研)
	13:00	花岡 真帆	松本 浩典	57		林田	松本	横田			
	13:20	津田 洗一郎	寺田 健太郎	58		横田	寺田	山中千博			
	13:40	室田 雄太	寺田 健太郎	58		寺田	植田	山中千博			
	休憩										
寺田	14:20	長村 燎	波多野 恭弘	59		波多野	谷口	鳴海(物理)			永野 優大(波多野研)
	14:40	藤倉 雅人	波多野 恭弘	59		波多野	桂木	湯川			
	15:00	水嶋 遼	波多野 恭弘	60	○	波多野	桂木	湯川			

16:00

判定会議:D303

(教授, 准教授, 講師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9日（火）

CANDLES 実験における ^{232}Th 起因バックグラウンドの低減に向けた検出器及び解析手法の改良

伊賀 友輝 川畑研究室(物理学専攻)

CANDLES 実験では CaF_2 結晶を 96 個用いて、 ^{48}Ca (Q 値 : 4.3 MeV) のニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊事象を探索している。本実験では、崩壊 Q 値に対応するエネルギー領域に事象を観測する方法を用いるため、Q 値付近にバックグラウンド (BG) が少ないことが求められる。しかし、結晶内に含まれる放射性不純物である ^{232}Th 系列が、BG として影響している。具体的には、 ^{212}Bi - ^{208}Tl - ^{208}Pb の崩壊が挙げられ、この ^{208}Tl の $\beta + \gamma$ 崩壊 (半減期 : 3.1 分) の Q 値は 5.0 MeV であり、 ^{48}Ca の崩壊 Q 値において BG になる。この BG を取り除くために、解析手法及び検出器の改良を行った。

解析手法の改良として、従来の解析では、 α 線と β (γ) 線の波形の違いや、エネルギー情報を用いて、 ^{212}Bi - ^{208}Tl の α 崩壊事象の識別を行い、その事象から 18 分の Veto を与えることによって ^{208}Tl - ^{208}Pb 崩壊事象を除去していた。しかし、この解析では、 ^{212}Bi 崩壊ではない事象も多く含んでしまい、Veto し過ぎて信号の検出効率低減を招いていた。本研究では、新たに最尤法を用いることで、 ^{212}Bi 崩壊事象の識別精度を上げることを試みた。

さらに、検出器の改良として、2018 年 11 月に不純物量が少ないと期待される結晶 14 個を新たに作成し、これまでに使用してきた結晶の中で、 ^{232}Th 系列不純物量が多い方から 14 個を交換した。本研究発表で、最尤法を用いたデータ解析法の改良による BG 低減率の評価結果と併せて、新結晶 14 個の ^{232}Th 系列不純物量の測定結果、及びそれによって期待される BG 低減率を発表する。

Si 検出器を用いた低エネルギー荷電粒子の波形弁別技術の開発

坂梨公亮 原子核実験(川畑)研究室 (物理学専攻)

α 凝縮状態は低密度核物質の研究において極めて重要である。 α 凝縮状態は全ての α 粒子が $0s$ 軌道に凝縮した状態であり、軽い核の α 凝縮状態との波動関数の重なりが大きい。そのため、 α 凝縮状態はひとたび励起されると、より軽い α 凝縮状態を経由しつつ全て α 粒子に崩壊すると考えられる。そこで我々のグループでは、 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 共鳴散乱を測定し、 ^{24}Mg の励起状態から放出される 6 つの α 粒子を同時計測することによって ^{24}Mg の 6 α 凝縮状態の同定を目指している。この反応で前方角度に放出される複数の低エネルギー α 粒子を同時計測し、陽子や重陽子などの他の荷電粒子と識別するために、大面積 Si 検出器を用いた検出器の大立体角化と、波形解析 (PSA) による粒子識別技術の開発を必要としている。

そこで本研究では、「① ^{24}Mg 実験で使用する大面積 Si 検出器の波形特性の調査」と、「② 低エネルギー荷電粒子の波形弁別技術の開発」を行った。神戸大学タンデム加速器 (①) で行った実験では、セットアップ条件を変更しながら 3MeV の陽子、重陽子、 α 粒子を Si 検出器で検出した。東北大学 CYRIC (②) で実施した実験では、 $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$ の breakup 反応により放出される 10MeV 以下の連続エネルギーの陽子・重陽子・三重陽子・ α 粒子を Si 検出器で検出した。このとき、FADC を使用して検出器全チャンネルの出力波形を 2ns 毎に取得した。解析には機械学習を導入し、従来の波形解析との比較を行った。発表では、本研究の結果を報告する。

スピン偏極 ^{31}Mg 核の β 崩壊による ^{31}Al 核の構造研究

前島大樹 川畑研究室 (物理学専攻)

原子核は陽子や中性子が核力を媒介して構成されている有限量子多体系である。陽子や中性子の数が魔法数(2,8,20,28,50,82,...)と呼ばれる数の原子核は特に安定となり、原子核の形は球形になる。しかし、身の回りに多く見られる壊れない安定な原子核に比べて陽子や中性子の数が極端に多い場合、魔法数の性質が消失し、原子核が回転楕円体に変形するという予想外の現象が報告され、その後、様々なグループによって研究されてきた。中性子数が魔法数 20 近傍の Ne、Na、Mg 核で最初にこの現象が見つかり、この領域は「逆転の島」と呼ばれている。これらの原子核は中性子が非常に多いため生成が難しく、原子核の形や運動等の構造を理解するために重要な物理量の 1 つである、スピン・パリティが決まっていなかったものが多い。我々のグループは逆転の島の領域の原子核の構造を系統的に理解するため、スピンの向きを揃えた原子核が β 崩壊するときの β 線の非等方性を利用し、娘核のスピン・パリティを決定するという独自の方法を用いて、 $^{28-31}\text{Mg}$ の原子核を研究してきた。今回、逆転の島に近接する中性子数 18 の ^{31}Al に着目し、スピン偏極 ^{31}Mg 核の β 崩壊による ^{31}Al 核の構造を理解するための研究を行った。実験は世界最高偏極度を供給可能なカナダの TRIUMF で行った。 β 崩壊後に放出される ^{31}Al の γ 線は高純度 Ge 検出器 8 台で、 β 線はプラスチックシンチレータ 10 台で同時計測を行った。

データ解析の結果、 ^{31}Al の γ 線のうち、過去に報告されていない 15 本の γ 線を新たに発見し、新たに ^{31}Al の準位構造を組み立て、エネルギー準位も 1 本加えた。さらにスピン偏極の向きに対して 0 度と 180 度に放出される β 線の数より β 線の非等方性を求め、6 本のエネルギー準位のスピン・パリティを決定した。このようにして得られた ^{31}Mg の β 崩壊による ^{31}Al 核への崩壊様式を理論計算と比較することで ^{31}Al の原子核の構造を議論した。

O(N)一重項模型における、「電弱一次相転移」によって生じる重力波の理論的研究

柴田 海輝 素粒子論研究室 (物理学専攻)

素粒子論では、粒子と反粒子が対称的に存在する。しかし、現在の宇宙は物質のみで構成されており、反物質は存在しない。物質として陽子、中性子が挙げられ、それらはバリオンと呼ばれる。同様に、反物質の例として反バリオンが挙げられる。つまり、宇宙誕生時にはバリオンと反バリオンは対称であったが、現在は非対称である。このように、バリオン非対称を作り出すことを、バリオン数生成という。バリオン数生成のためには、サハロフの三条件を満足する必要がある。それは(1)バリオン数を破る過程が存在すること、(2)C 対称性と CP 対称性の両方が破れていること、(3)非熱平衡状態が実現すること、である。電弱バリオン数生成の場合において、3 つ目の「非熱平衡状態の実現」は、「電弱一次相転移の実現」に置き換えられる。しかし、素粒子の標準模型においては、電弱一次相転移は起きない。そのため、標準模型にスカラー場を加えた「O(N)一重項模型」の場合について考えた。O(N)一重項模型の場合、電弱一次相転移が起きる。電弱一次相転移が起きると、重力波が生成される。宇宙の温度が下がると、対称性のある相に、対称性の破れた相が核生成される。そして、対称性の破れた相が膨張し、対称性の破れた相同士が衝突する。その衝突によって重力波が生成する。重力波源は三つある。一つ目は泡の壁の衝突である。二つ目は、泡の衝突によって生じた音波である。三つ目は、泡の衝突によって生じた磁気流体力学的な乱流である。それらの重力波スペクトルを求めた。そのためにまずは、相転移における潜熱 α と、相転移の持続時間の逆数 β を求めた。その α と β をもとに、重力波スペクトルのグラフを作成した。加えて、2030 年代に完成予定の重力波検出器 LISA および DECIGO の感度領域も図示した。それらの図から、O(N)一重項模型における、「電弱一次相転移」によって生成した重力波を検出できる可能性があることがわかった。

光共振器中のフォトン・ダークフォトン振動

芝野敦子 素粒子理論研究室(物理学専攻)

標準模型のゲージセクターの最小拡張の一つとして、ダークフォトン模型がある。この模型はフォトン・ダークフォトン振動現象を预言する。これを用いたダークフォトン検出実験が進められている。本研究では、レーザーを用いた検出実験を念頭に置き、光共振器中でのフォトン・ダークフォトン振動確率の増幅機構について議論する。フォトンからダークフォトンへの振動の光共振器による増幅は直感的に理解できるが、ダークフォトンからフォトンへの振動の増幅はより詳しい解析が必要であり、これについて明らかにする。

古典的スケール不変性に基づいた拡張ヒッグス模型における 高精度計算を通じた新物理の探究

下田 誠 素粒子論研究室(物理学専攻)

素粒子の標準模型は素粒子の現象を記述する現在最も優れた理論である。一方で、標準模型では説明できない問題も存在する。階層性問題やバリオン数非対称性問題などがその例であり、これら諸問題を解決する新物理理論が探究されている。

古典的スケール不変性に基づいた拡張ヒッグス模型は、それら諸問題を解決し得る新物理理論の一つである。その模型において、ヒッグス三点結合を1ループレベルで計算すると、標準模型に新たに加えたスカラー粒子の質量や結合定数などの模型の詳細によらずに、標準模型の预言値から+82%という大きなずれが現れる。このヒッグス三点結合の標準模型からの大きなずれは、電弱バリオン数生成のシナリオによるバリオン数非対称性問題の解決と関係しており、新物理理論に迫る上で重要な効果である。

上記の1ループレベルでのヒッグス三点結合への大きな効果は、2ループレベルでも大きく現れると予想される。そのため、正確なヒッグス三点結合に対する预言を行うためには2ループレベルの計算が必要である。本研究では古典的スケール不変性に基づいた拡張ヒッグス模型として、標準模型にN個(N=1,4)のスカラー粒子を加えた模型(CSI-Nスカラー模型)、および標準模型に二重項を追加した模型(CSI-2HDM)において、ヒッグス三点結合に現れる2ループレベルの主要な寄与を計算した。その結果、2ループレベルにおいては模型による違いが現れ、1ループレベルで模型によらずに+82%であったヒッグス三点結合の標準模型からのずれの大きさは、CSI-Nスカラー模型ではN=1(4)で+99~114%(+93~109%)、CSI-2HDMでは+90~113%であることが得られた。これらの結果は本研究で初めて得たものであり、ヒッグス三点結合にはILCなどの将来実験で観測可能なほど大きな効果が得られたため、将来実験による精密測定と合わせて新物理理論を探究する上で意義のある結果である。

圏論的対称性を用いた2次元ゲージ理論の解析

小出真嵩 素粒子論研究室 (物理学専攻)

対称性は場の理論の構造を調べる上で基本的かつ重要なツールである。これまでよく調べられてきた群論的対称性では、その対称性変換を可逆 (invertible) な演算子の言葉に焼き直すことができた。そのような演算子は、対称性から導かれる保存則より、連続変形の下で不変なトポロジカルという性質をもつ。しかし、一般のトポロジカルな演算子は、非可逆 (non-invertible) のため、群論的な対称性をその背景に持つとは限らない。そのような非可逆でトポロジカルな演算子の背景に存在する、これまでの群論的対称性の類似物として、圏論的対称性が提案された。本発表では、そのような圏論的対称性と非可逆な線演算子の性質について説明する。またそのような線演算子を用いて、2次元の質量のない随伴表現のQCDの解析を行い、基本表現のWilsonループが周長則に従うことを示す。これは圏論的対称性が強結合の場の理論の解析に役立つことを示す例である。

ブラックホールの形成の臨界点における問題

西川 航平 素粒子論研究室 (大野木研究室) (物理学専攻)

Cosmic censorship conjecture (CCC)には、critical collapseという反例が存在することが分かっている。Critical collapseとは、重力崩壊を起こす場のパラメーターの値が大きくblack hole (BH)が形成されるときと、パラメーターの値が小さくBHが形成されないときの境目のときに起こる現象でnaked singularityが生じる。この反例に対して、CCCを修正する。もともと、CCCは「我々が住むBHの外の領域にはsingularityがなく、そのため一般相対論のみで記述できる。」という仮説だった。ここで、critical collapseでは、naked singularityが形成されるようなパラメーターの値よりも、少し大きくPlanck size BHが形成するとき、既に量子重力が必要になっているのでCCCが破れている。しかし、Planck size BHは高温のため、形成されてもすぐに蒸発してしまうと予想される。そこで、CCCを「massが小さなBHで、なおかつ蒸発により一瞬で消えるような場合は量子重力が必要になるが許す。」と修正する。これは元のCCCを大きく変更することなく修正できている。しかし、Planck size BHの蒸発過程を実際に計算するには量子重力が必要になるため、本当に一瞬で蒸発するか確認するのは難しい。そこで本論文では、critical collapseの後、一瞬で蒸発してflat時空になると予想する。そして、その二つの領域の境目でquantum stateがスムーズであるかに注目して、この予想が正しいかについての議論を深める。

Anomaly Inflow In Curved Space

青木匠門 素粒子論研究室 (物理学専攻)

対称性は物理学において重要な概念の一つである。しかし、経路積分による場の量子論の定式化では、古典的には期待できる対称性が存在しない場合がある。これは古典的な対称性が量子効果で破れることを意味し、アノマリーと呼ばれる。アノマリーは有限自由度と非可算無限の自由度のずれから生じる。

空間にドメインウォールが存在する場合、高次元時空におけるアノマリーがドメインウォール上のアノマリーを補正し、全体としてアノマリーの無い理論を構成できる。これはアノマリー流入と呼ばれ、Callan-Harvey 機構やドメインウォールに局在する状態で説明される。そこで、曲がった空間を高次元の空間にドメインウォールとして埋め込むことを考える。重力はこれによって再現されるため、曲がったドメインウォールに局在したフェルミオンによってアノマリーへの重力の寄与を計算できると期待できる。

本研究では最初に、ドメインウォールで重力アノマリーを再現することを念頭において、重力アノマリーの構成をレビューした。重力アノマリーは、古典的に期待できる局所 Lorentz 変換や一般座標変換が量子効果で破れることを表す量である。そして、この2つから生じるアノマリーが局所 counter term で移り合い、本質的に同じであることを確認した。

次に Euclid 空間に曲がったドメインウォールを設置して、フェルミオンの振る舞いを調べた。ドメインウォールとして球面や円筒を用いて、ドメインウォールに局在する状態の固有値や相関関数を解析的に求めた。

Information paradox and island prescription

姉川 尊徳 素粒子論研究室 (物理学専攻)

Black Hole の情報喪失問題は、Hawking が提唱して以来重力理論に対する研究への大きな動機となっていた。その主な問題は Hawking の結論をそのまま信じれば、量子力学における Unitarity との矛盾、Entanglement Entropy の無限増加、Black Hole へ落下した物体についての情報の喪失など深刻な結論に至るということであった。AdS/CFT はこの問題に対して Unitarity を尊重すべしというひとまずの回答を与えるが、それは具体的な情報の回収方法についてはなにも言及してくれないのが現状であった。去年、Penington らがこの問題に一石を投じた。彼らによれば、Black Hole 蒸発の過程において Black Hole の内部に「外部」と関係する領域 (島: Island) が現れ、内部の情報を理論的には外部に取り出せるようになる。すなわち、Island が現れた場合情報喪失問題は解決されうる。一見突飛な発想ではあるが、複数の方法でこの正当性は少しずつ保証されつつある。ただ、Island を考慮するという考え方は提案されてから未だ日が浅く、この手法がどれほど一般的なものなのかははっきりしていない。本研究は、主に漸近的 AdS 時空でなされていた Island の解析を、それとは本質的に異なる漸近的に flat な時空に対して行うことで、Island の存在というものが flat 時空においても有効な主張であること、すなわちより一般的な主張であることを示した。この修士論文は主に論文[1]について研究の背景も踏まえて詳しく議論したものである。

[1] T.Anegawa and N.Iizuka “Notes on islands in asymptotically flat 2d dilaton black holes”
arXiv:2004.01601 [hep-th]

アイソスピン 2 重項由来の複電荷スカラー場の現象論的研究

片山兼渡 素粒子論研究室 (物理学専攻)

素粒子標準模型は現在の素粒子物理において最も成功したモデルであり、今までに得られている実験結果の多くを非常によく説明できる。しかし標準模型では説明することのできない現象も確認されており、それらの未解決問題を説明することのできるような、標準模型を超えた新物理モデルを解明することは現在の素粒子物理学において最も重要な課題の一つである。

新物理モデルの中には、電荷 2 を持つ複電荷スカラー粒子が導入されるモデルがある。そのようなモデルは、重要な未解決問題の一つである「ニュートリノの微小質量問題」を説明することのできるようなモデルであることが比較的多い。よく導入される複電荷スカラー場としてはアイソスピン 1 重項や 3 重項由来のものであるが、最近ではアイソスピン 2 重項由来の複電荷スカラー場が導入されるモデルもいくつか提案されている。複電荷スカラー粒子は標準模型には含まれていないので、このスカラー粒子の探索と量子数の特定は、それを含むモデルの検証において非常に重要な意味を持つ。しかし、アイソスピン 1 重項・3 重項由来の複電荷スカラー場の加速器における現象論が詳しく研究されている一方で、アイソスピン 2 重項由来の複電荷スカラー場に関しては、詳細な研究がほとんどされておらず、加速器における現象論はよく分かっていない。

本研究では、アイソスピン 2 重項由来の複電荷スカラー場の現象論を明らかにするために、この複電荷スカラー場を含むようなミニマルな新物理モデルを用いて、近い将来に実現する高輝度大型ハドロン衝突型加速器(HL-LHC)での実験における、複電荷スカラー粒子の生成と崩壊現象のシグナル・バックグラウンド解析を行い、複電荷スカラー場の検証方法・可能性を考察した。結果として、HL-LHC での実験では、複電荷スカラー粒子の質量を特定できる可能性が十分にあることが明らかになった。

場の理論における 2 群対称性

名古屋雄大 素粒子論研究室 (物理学専攻)

近年、対称性の一種である高次形式対称性が注目されている。高次形式対称性とは、弦などの広がった物体へ作用する、通常対称性とは異なる対称性である。高次形式対称性は、様々な強結合な場の理論の相構造へ制限を加えることができるため、場の理論の解析において強力なツールである。高次形式対称性の更なる拡張として、2 群対称性が存在する。2 群対称性とは、通常対称性と高次形式対称性がある種、混ざり合うことを許した対称性である。場の理論において、2 群対称性は有用である。例えば、自発的対称性の破れなど、相構造へ強い制約を与えられる。より具体的には、光子の存在とグローバル対称性の破れについて関係づけることができる。さらに、強結合のゲージ理論の相構造への応用に対しても、2 群対称性が非自明な制約を与える。

Recent works about Superconformal Index and Blackhole entropy

毛受正裕 素粒子論研究室 (物理学専攻)

AdS/CFT 対応による量子重力の理解において、重力に対応する場の理論が強結合となることは理論を解析的に理解する上で大きな問題点となっている。そこでSuperconformal Index と呼ばれる結合定数に依らない指標を用いることによりこの問題を回避しようと試みられてきた。この論文ではまず、与えられた理論に対してSuperconformal Index を計算できるようになると同時にその物理的な意味を理解することを目標とし、この分野における近年の研究についてもレビューした。本発表ではIndexを求めるのに必要なletterindexの計算方法について簡単にレビューする。

非局所的相互作用フェルミオン系における磁気触媒作用

肥後本 拓也 原子核理論研究室 (物理学専攻)

1次元クーロンポテンシャルの下で、電子の最低束縛エネルギーは負の無限大になるという特異性が知られている。この特異性の発見により、低次元物性の分野で注目を集め量子細線等の1次元系の研究が多く行われた。その中でも、1次元励起子(電子と正孔の間のクーロン相互作用による束縛状態)の結合エネルギーの極端な増大等の可能性が指摘されている。

この状況が原子核分野で実現するならば、クォーク対が強く束縛しカイラル対称性の破れの指標であるカイラル凝縮の極端な増大が確認できるのではないかと考えた。1次元系は非常に強い磁場を加えることによって擬似的に実現されるので、カイラル凝縮の磁場依存性の強磁場極限に注目する。また、クォークと反クォークの間に働く引力は短距離領域でクーロンのように振る舞う。NJL(Nambu Jona-Lasinio)モデルや格子QCD(量子色力学)で計算した先行研究によると、カイラル凝縮は磁場の増加とともに強められる(磁気触媒作用)ことが分かっている。しかし、NJLモデルはQCDの低エネルギー有効モデルであるため、短距離領域は考慮されておらず、格子QCDには短距離領域に加え、長距離領域の効果も入っている。したがって、クォーク間相互作用が短距離領域でクーロンのような振る舞いであることがどのように磁気触媒作用に影響を及ぼすかを調べるため、本研究では短距離領域のみに注目した解析を行った。

本研究では、クォーク間相互作用の短距離領域でのクーロンのような非局所性の効果が特異的なものであれば、長距離領域での振る舞いに関係なくカイラル凝縮に強く反映されると予想し、tree-levelのgluon交換の相互作用によるgap方程式を解析した。その結果、短距離領域でのクーロンのような相互作用による、カイラル凝縮が異常に増大するような特異性は確認されなかったが、NJLモデルと比較して磁場依存性の乗数が大きいことが分かった。

場の理論におけるソリトンの量子振動とエネルギー運動量テンソル

伊藤広晃 原子核理論研究室 (物理学専攻)

場の理論にはソリトンと呼ばれるエネルギー密度が局在した安定解が存在する。ソリトンは場の方程式の古典解であるが、量子効果とその構造に与える影響の議論が古くからなされてきた。QCD では静的なクォーク反クォーク対の間にフラックスチューブが作られることが知られており、これは一種のソリトンと解釈される。フラックスチューブの量子振動によって、古典的なカラー電場の分布が広がることが指摘されている。フラックスチューブの力学構造の理解はカラー閉じ込め機構の解明に欠かせない。

本研究では 2+1 次元系に現れるソリトンであるドメインウォールの量子効果がエネルギー運動量テンソル(EMT)分布に与える影響を調べる。近年格子ゲージ理論による数値解析における新しい EMT 測定手法が開発され、クォーク反クォーク系の EMT 分布の測定が行われた。今後この手法を用いた様々な系の EMT 分布の数値測定が実現し、ゲージ理論に現れるソリトン構造の EMT を用いた研究が発展することが期待される。

本研究では、ソリトンの量子効果が EMT 分布に与える補正を調べるために、1+1 次元と 2+1 次元の実スカラー ϕ^4 理論に現れるドメインウォールの解析を行う。2+1 次元の場合は、全エネルギーを有限にするために、系に固定境界条件を課す。この系の EMT 分布を古典的なソリトン解周りのガウス近似の範囲で量子効果を取り込んで解析した。

格子ゲージ理論におけるクーロンゲージ固定アルゴリズムについて

大畠 涼介 原子核理論研究室 (物理学専攻)

場の量子論に現れる物理量の発散を抑える手段の中でも、格子正則化は非摂動領域に適用できる点や、ゲージ対称性を保つ点から非常に強力な手法として知られている。これらの性質から、格子正則化は強い相互作用を記述する量子色力学(QCD)でよく用いられ、格子上で QCD を定式化した理論は格子 QCD と呼ばれる。格子 QCD では計算機上で具体的な数値解析ができるため、数多くの研究が格子 QCD による数値解析を用いて行われている。

格子 QCD による数値解析を行う際に、ゲージに依存する量の解析や、スメアリング等の操作を行う場合には、クーロンゲージ等へのゲージ固定が必要となることがある。格子上でゲージ固定を行う場合、アルゴリズムとしては目的のゲージ条件を満たすまで繰り返し配位を更新する反復法が用いられる。しかし、現行のゲージ固定アルゴリズムでは、同じ空間体積を扱う場合でもアルゴリズムの計算時間がゲージ配位に依存してしばしば極端に遅くなることが知られており、これが格子 QCD 数値解析におけるゲージ固定の計算コストを増大させる要因となっている。

本研究では、このクーロンゲージ固定アルゴリズムの収束速度が悪化する原因の特定に取り組んだ。格子 QCD は SU(3)ゲージ理論によって記述されるが、本研究ではより基礎的な U(1)、SU(2)ゲージ理論でのクーロンゲージ固定アルゴリズムに注目した。計算手法として各格子点ごとに更新を行う Los Alamos 法・過緩和法を用い、空間 1~3 次元でそれぞれ解析を行った。これらの場合に対し、シミュレーション及び線形解析の結果を比較することにより、U(1)ゲージ理論では位相欠陥と呼ばれる局所的な構造が収束速度の悪化やアルゴリズムが停滞する原因になっていること、SU(2)ゲージ理論ではゲージ場の非可換性が収束速度の悪化に関係していることを突き止めた。

カラー超伝導の臨界温度周辺におけるソフトモード とレプトン対生成率の解析

西村透 原子核理論研究室 (物理学専攻)

QCD 相図上の低温・高密度領域にはカラー超伝導 (CSC) が存在することが理論的に知られているが、これまでこの相の存在を確証づける実験結果は存在しない。しかし近年、米国 RHIC で BES-II における重イオン衝突実験が進行しており、この実験によって高密度物質の研究が飛躍的に発展することが期待される。更に、ドイツでは FAIR が建設中であり、日本では J-PARC-HI が計画中等であるなど高密度物質を目指す重イオン衝突実験は今後更なる発展が期待される。このため、これらの実験で CSC を観測するための観測量を調べることは興味深い課題である。

しかしながら、重イオン衝突実験では CSC が実現したとしても一瞬であり、CSC 相を直接観測することは困難である可能性が高い。そこで本研究では CSC の中でも比較的低密度で実現すると考えられている 2SC 相に焦点を当て、その転移温度付近でのダイクォークペア場の揺らぎに起因するレプトン対生成率を計算する。先行研究により、この揺らぎに対応するソフトモードが相転移温度よりも高温かつ、相転移付近の温度で増大することが示されている。相転移付近ではこのソフトモードの寄与により、低エネルギー領域のレプトン対生成率に大きな影響を与える事が期待できる。

本研究では、2SC の相転移に伴うソフトモードが関与するレプトン対生成過程を見るために、2フレーバーNJL 模型を用いて、Aslamazov-Larkin 項・Maki-Thompson 項という光子自己エネルギーの計算を行う。これら 2種類の項を考慮することにより、Ward 恒等式が満たされることを示す。これらの計算で得られる光子自己エネルギーを用いて単位不変質量あたりのレプトン対生成率を計算し、ソフトモードが低エネルギー領域のレプトン対生成量に与える影響について論じる。

物理学専攻
素粒子・原子核グループ
会場：H701
2月10日（水）

自己生成磁場を用いた4レーザービームによる電子のガイディング

嶽村真緒 藤岡研究室 (物理学専攻)

レーザー核融合の一つである高速点火方式では、レーザープラズマ相互作用によって発生した相対論的電子ビームによって核融合燃料を加熱する。しかし、発生する相対論的電子ビームの発散角は非常に大きく、これが加熱効率低下の要因の一つとなっている。その相対論的電子ビームを効率的に核融合燃料にガイドする手法の一つに自己生成磁場を用いた電子のガイディング方法がある。自己生成磁場は抵抗率の異なる物質境界面に生じ、電子を高抵抗率側に閉じ込める効果がある。

高速点火方式で核融合点火を実現するには追加加熱レーザーのレーザーエネルギーを上げることが必要不可欠である。しかし、レーザーエネルギーはレーザーが通過する光学素子のダメージ閾値によって制限される。点火に要求するレーザーエネルギーに耐えうる光学素子のサイズは現実的ではないことから、ターゲット上のレーザーエネルギーを上げるにはマルチレーザービームが必要である。

先行実験ではシングルレーザービームとプラズマの相互作用によって生成された相対論的電子ビームの自己生成磁場による電子のガイドが実証されている。シングルレーザービームでは自己生成磁場による電子のガイディングが観測されたこと、また高速点火方式での核融合点火の実現のためにはマルチレーザービームが必要であることから、マルチレーザービームでの自己生成磁場による電子のガイディング実験を行なった。

本発表では上記の実験結果および考察について発表する。

高速点火核融合における加熱効率に関する研究

瀧澤龍之介 藤岡研究室

レーザー核融合の高速点火方式の研究は日米中欧英で盛んに行われており、高強度レーザーによるプラズマ加熱の効率向上が課題である。主に下記の二つの要因で加熱効率が低下する。一つめは、コーンの内部に形成されるプレプラズマによってレーザーで生成した相対論的電子ビーム (Relativistic electron beam: REB) が高エネルギー化し、燃料にエネルギーを十分に付与しない点である。二つめは、REBの発散角が大きく、REBの一部のみが燃料を加熱する点である。二つめの原因を緩和させるため、集束形状のキロテスラ級の磁場を電子ビームの伝播領域に外部から印加し、レーザー加速電子ビームを核融合燃料に集束させる事により加熱効率を倍増させることに成功している[1]。

本研究では、加熱ビームであるLFEXビームの高コントラスト化を行い、コーン内部のプレプラズマの生成を抑制した。LFEXの高コントラスト化には、先行研究にてパルスコントラストを二桁上昇させる事に成功しているプラズマミラーを用いた。燃料を模擬したターゲットとしては金コーン付きオレイン酸銅用い、円筒対称性に配置された6本の激光XII号ビームによって圧縮した。

プラズマミラーを用いなかった場合と比べ、プラズマミラーを用いた場合はREBの平均エネルギーは1.2MeVから0.22MeVに低下し、加熱レーザーからREBへのエネルギー変換効率は1.4倍に上昇した。結果として、加熱レーザーによるドラッグ加熱効率は1.8倍上昇した。

参考文献

[1] S. Sakata *et al.*, “Magnetized fast isochoric laser heating for efficient creation of ultra-high-energy-density states”, Nature Communications, 9, Article number: 3937 (2018)

レーザープラズマからの放射ガンマ線測定

森浩睦 核物理研究センター (物理学専攻)

超高強度短パルスレーザーを固体標的に照射すると、高温で高密度なプラズマ（レーザープラズマ）が形成される。レーザープラズマの形成メカニズムとしては様々なモデルが提案されているものの、近年実現したレーザーの集光強度が 10^{21-22} W/cm² の領域の現象については未解明である。先行研究ではプラズマ内の電場によって加速された数 10 MeV の陽子・電子・イオンをプローブとしてレーザープラズマ内部の現象の理解が試みられてきた。しかし、レーザープラズマから放出されるガンマ線についての研究は少ない。

本研究では、関西光科学研究所の J-KAREN-P 装置で生成した数 $\times 10^{21-22}$ W/cm² のレーザーを標的（銀およびステンレス）に照射し、レーザープラズマから放出されたガンマ線を測定した。レーザープラズマから放出される大量の低エネルギー光子の存在下では、通常の放射線検出器を用いたガンマ線の測定が困難である。そのため、本研究では放射化法を用いた。

放射化法は放射線が安定核種を放射性核種に変換する反応（放射化）を利用した放射線の測定方法である。放射性核種は固有の寿命で壊変し、その際に固有のエネルギーのガンマ線を放出する。そのため、測定対象となる放射線を試料に照射した後、試料から放出されるガンマ線を測定すれば、生成された放射性核種の同定と定量が可能である。さらに、ガンマ線による放射化過程の反応断面積は既知であるため、放射性核種の生成量から照射ガンマ線量を評価できる。放射化反応にはエネルギー閾値が存在するため、放射化法を用いることで低エネルギー光子による影響を排除することが出来る。

本修士論文では、2 種類の放射化試料（銅）中に生成された放射性同位元素の生成量について報告する。そして、レーザープラズマから放出されたガンマ線のエネルギーや角度分布について議論する。

ナノ粒子標的を用いた中性子小角散乱による未知相互作用探索

近藤亮太 核物理研究センター (物理学専攻)

自然界には電磁気力、弱い力、強い力、重力の 4 つの基本相互作用が存在する。これらの 4 つ全ての力を統一して記述する理論の候補として超弦理論等が提唱されている。

しかしながら、超弦理論では我々の知っている 4 次元時空間に加えて、さらに多くの次元が必要である。この 4 次元時空間以外の次元を余剰次元と呼ぶ。この余剰次元は今まで発見されたことはない。そこで余剰次元は非常に小さな点にコンパクト化されていると考えられてきた。余剰次元理論モデルの一つである ADD モデルでは、余剰次元が 3 次元の場合、その大きさが nm 程度になることが指摘されている。そこで、我々の研究グループは nm オーダーにおける重力の振る舞いを確かめる研究を行ってきた。

nm オーダーにおける重力の検証では、電磁気力の一種であるファンデルワールス力が測定バックグラウンドになるため、我々は電氣的に中性である中性子を試験粒子として採用し、この問題を回避する。入射中性子ビームと標的粒子の微分散乱断面積を測定し、未知相互作用ポテンシャルによる散乱が示す前方ピークを信号として探索する。

重力的な未知相互作用の強さは標的の質量に比例して増大するため、探索する相互作用レンジと同程度のサイズを持つ標的を使用することが感度向上の鍵となる。我々は、ナノ粒子標的における中性子干渉性散乱を利用することにより、これまで行われてきた単原子分子標的による探索実験よりもさらに高感度な探索実験を進めている。

2020 年 12 月に茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) にある物質・生命科学施設 (MLF) にある BL05 ビームラインにて、Si、Ni、Zn、Ag の 4 種類のナノ粒子標的を用いた中性子小角散乱実験を行った。

本研究では、この実験結果を報告し、今後の課題について議論する。

真空のエネルギーの未解明の成分に関する研究

中井 創 核物理研究センター (物理学専攻)

場の量子論における最低エネルギー状態である真空は、ゼロではないエネルギーを持つ。これは、真空のエネルギーと呼ばれ、通常無限大に発散する。しかし、物体によって真空に境界条件を与えることで、真空のエネルギーは修正を受け、Cut-off パラメータ Λ を与えることで、自己エネルギー、輻射補正、Casimir エネルギーの3項に分かれた形に定式化できる。このうち、Casimir エネルギーは物体間の距離に依存し、物体間に働く引力 (Casimir 力) として測定可能であることが Casimir 効果として知られている。

一方で、残りの2項に関しては、Casimir 効果を考えるうえで、相殺されて計算上消えることから詳しい研究がなされてこなかった。我々はこの内、Cut-off パラメータに依存する自己エネルギー項に着目した。この自己エネルギー項は、Casimir エネルギー項とは反対の符号を持ち、斥力を生み出し得るという特徴を持つ。この性質は、宇宙背景放射の揺らぎの観測等から存在が示唆されているダークエネルギーの性質と類似しており非常に興味深い。そこで、本研究では、真空の自己エネルギーを測定するための実験手法を考案し、そのための基礎開発研究を行った。

まず、この Cut-off パラメータ Λ は、電磁気学的なモデルの考察から、空間を区切る物体の物性特性に依存することが導かれた。次にこの点踏まえ、自己エネルギーによって発生する圧力を測定する際に、極板の物性を非接触で制御可能な実験装置を考案した。本装置では、照射される光の強度によって電気伝導度に変化する光半導体を極板の材料を用いることで、Cut-off パラメータ Λ をオンラインで変化させることで、自己エネルギー項の寄与を測定する。

本研究では、極板材料の候補として光半導体の一つである CdTe に取り上げ、光伝導特性を測定し、本実験における有効性を確認した。

RCNP における永久磁石型 2.45 GHz ECR 陽子源の開発

大本恭平 核物理研究センター 加速器研究グループ (物理学専攻)

大阪大学核物理研究センター (RCNP) では、原子核・素粒子物理学などの基礎科学から産業・医療分野の応用研究まで、幅広い分野に二次粒子 (ミュオン、中性子、不安定核など) のビームを供給している。その中で近年特に、中性子や RI などの大量製造のニーズが高まっており、大強度の二次粒子ビームの供給が求められている。これらの要求に応えるために、現在 RCNP では、一次粒子ビームの強度増強のために AVF サイクロトロンアップグレードを始めとした様々な研究開発が進行中である。

このビーム強度増強の研究開発の一環として、永久磁石型 2.45 GHz ECR 陽子源の高輝度大強度化の開発に取り組んだ。サイクロトロンの入射アクセプタンス範囲内のエミッタンスにおける大強度ビームをイオン源から供給する必要がある。これを実現するため、この ECR 陽子源からの陽子ビームの高輝度化の開発・改良を行った。

従来この ECR 陽子源では、加速電圧 15 kV で 500~600 μA 程度の陽子ビームが得られていたが、本研究では mA 級の強度を目標とする。50 kV に引き上げられる加速電圧に対応し、ビームを効率的に引き出せる電極を、ビーム軌道シミュレーションコード IGUN を用いて設計した。加えてビームの電流密度が Child-Langmuir 則に従うならば、この加速電圧の引き上げにより陽子ビームの強度は約 6 倍になることが期待される。またビーム強度増強のために、多量の陽子を生成するための電場の強度増強も行った。これは三次元電磁場解析コード HFSS を用いたシミュレーションによって、電場強度が最大化するような条件を決定した。

これらの開発を行ったうえで、ビーム性能の予備的な試験を行った。この性能評価ではビーム電流値の測定を行い、電極設計の有意性がおおむね確認されるなどの結果を得ることができた。

Development and performance evaluation of the DAQ system used for testing new ATLAS pixel modules for the HL-LHC

Lakmin Vindula Bandara Wickremasinghe

山中卓研究室 (物理学専攻)

The inner tracker system of the ATLAS detector is undergoing upgrades for the High Luminosity-LHC. Due to the increased number of collisions and higher radiation damage, the current pixel detectors in the inner tracker system will be replaced with new ones with better performance. The main part of the improvement can be attributed to the newly developed ASIC (Application Specific Integrated Circuit), which has the ability to transmit data at 1.28 Gbps.

About 10,000 new pixel detectors will be produced in production sites around the world, and Japan plans to produce roughly 2,000 of them. During this mass production, it is essential to develop a proper testing system for Quality Assurance and Quality Control (QA-QC) of these pixel detectors.

For this testing system, several data adapter cards capable of reading data at high speeds, and power adapter cards capable of powering and monitoring the pixel detectors were developed. The performance of these adapter cards were verified through several independent tests which are reported in this thesis.

From 2020 summer, we have started the production of the first prototypes of the new ATLAS pixel detectors in Japan. Using these pixel detectors, the performance of the overall Data Acquisition (DAQ) system (including the adapter cards) used for testing was verified. Simultaneously, the performance of the first prototype pixel detectors in the world was also verified. Through this, it was confirmed that the developed DAQ system could be used to assure and control the quality of pixel detectors at testing sites around the world.

J-PARC KOTO 実験に用いる高レート荷電粒子検出器のための信号増幅および波形整形回路の開発

白石諒太 山中卓研究室 (物理学専攻)

J-PARC KOTO 実験では、中性の K 中間子による稀な崩壊 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を通じて CP 対称性を破る新物理を探索している。標準理論では、この崩壊の分岐比は 3.0×10^{-11} と予測されているが、これまで行われた実験でこの崩壊は観測されていない。

我々が使う K_L ビームの中には、 K^\pm が K_L に対して 2.6×10^{-5} の比率で混入している。それが検出器の崩壊領域内で $K^\pm \rightarrow \pi^0 e^\pm \nu$ の崩壊をし、 e^\pm が検出されなかった場合に背景事象になりやすい。2016-2018 年に取得したデータの解析では、この荷電 K 中間子の崩壊が最大の背景事象であった。

このような事象を排除するために、新たに Upstream Charged Veto (UCV) という荷電粒子検出器を開発し、2020 年 12 月に KOTO 検出器上流部のビームライン中に設置した。UCV はシンチレーションファイバーで構成され、シンチレーション光を半導体光検出器で読み出す。本研究では、この検出器の信号を増幅し波形を整形する回路を開発した。この回路ではビーム中という高レートな環境においても、複数の波形を重複して出力しないという動作が求められる。そのためこの回路は信号を増幅するとともに、光検出器から出力される 100ns 程度の長いテールを持った波形を短くする役割を持つ。開発の結果、信号を約 18 倍増幅し、出力波形の時定数を 50ns 未満の短い幅に整形できた。さらに開発した回路と検出器を KOTO 実験装置に設置し、実際の動作環境である真空中でも動作に問題ないことを確認した。

J-PARC KOTO 実験における $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象数の評価と削減

乃一雄也 山中研究室 (物理学専攻)

J-PARC KOTO 実験では、中性 K 中間子の稀な崩壊である $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の観測を通して新物理の探索を行っている。この崩壊は、標準理論で予測されている分岐比が 3×10^{-11} と非常に小さいため、新物理による違いを捉えやすい。このように崩壊分岐比の小さい事象を探索するためには、背景事象を理解し削減することが重要である。

KOTO 実験で用いているビームの外縁部には、検出器上流で散乱されビーム中心軸から大きく離れた飛跡を描くビームハローの K_L が存在する。このハロー K_L が二光子へ崩壊すると実験の背景事象となりうる。これは $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象と呼ばれる。

これまでのシミュレーションでは、この $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象数が正確には見積もられていなかった。よって本研究では、 $K_L \rightarrow 3\pi^0$ サンプルによって測定したハロー K_L のフラックスを用いてシミュレーションを補正した。結果として、2016, 2017, 2018 年に取得したデータの解析における感度 (信号事象の分岐比が 7.2×10^{-10} であれば 1 事象の観測を期待できる感度) での $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象数を 0.26 ± 0.07 と見積もった。

さらに、クラスターの形状および運動学的変数の違いを利用して、 $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を削減する新たなカットを開発した。このカットは信号事象の検出効率を 90% に保ち、 $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象数を 96% 以上削減することができる。この削減によって、標準理論による信号 1 事象に対応する $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象数は 0.4 事象以下となる。

COMET 実験に用いる新型 SiPM の中性子耐性に関する研究

佐藤良紀 青木研究室 (物理学専攻)

COherent Muon to Electron Transition (COMET) 実験とは、荷電レプトンフレーバー非保存過程の 1 つである $\mu - e$ 転換過程の観測を目指す実験である。この事象は現在の標準理論で強く禁止されているため、観測が実現すれば新物理の発見に繋がる。COMET 実験は Phase-I と Phase-II の 2 段階に分けて実施予定であり、現在 Phase-I の実験開始に向けて準備中である。

COMET Phase-I では、メイン検出器のトリガー及び時間測定検出器として Cherenkov Trigger Hodoscope (CTH) を使用する。CTH はプラスチックシンチレータ、チェレンコフカウンタ、ライトガイド、光検出器により構成され、信号電子が通過した時に放出される光を検出することで動作する。CTH は 1 T の磁場耐性が要求されるため、光検出器には現在ファインメッシュ型 Photo Multiplier Tube (PMT) の使用が検討されている。本研究で用いる Multi Pixel Photon Counter (MPPC) が使用可能であればいくつかの利点があるが、中性子耐性が不十分な可能性があるため正式に使用可能か結論付けることができていない。

MPPC とは、浜松ホトニクス株式会社製の Silicon Photo Multiplier (SiPM) である。SiPM は中性子が照射されることにより構造欠陥が生まれ、熱電子起因のノイズが増加する。中性子の照射量が増加すると信号とノイズの識別が不可能になり、光検出器として使用不可能となる。

本研究では新型 MPPC の中性子耐性評価試験を行い、COMET Phase-I での使用可能性を評価した。ノイズの主成分は熱電子起因のものであるため、低温の場合はノイズが小さくなることが期待される。そのため、室温の場合とドライアイスで冷却した場合にどの程度の中性子流量で使用が不可能になるか評価し、COMET Phase-I で MPPC の CTH における光検出器としての使用可能性を結論付けた。

Study of Gas Gain Saturation for Cylindrical Drift Chamber in COMET Phase-I

Sun Siyuan

Aoki Laboratory

Department of Physics

The COMET experiment aims to explore the muon electron conversion process, which is a non-conservation process of charged lepton flavors, and is planned to be conducted in two stages, Phase-I and Phase-II. The cylindrical drift chamber (CDC) which performance was evaluated this time is a detector for capturing electrons generated in the muon electron conversion process in Phase-I. The momentum resolution required for the CDC is $200 \text{ keV} / c$ for the $105 \text{ MeV} / c$ electron to be detected, and the position resolution is about $200 \mu\text{m}$. To achieve the momentum resolution and distinguish different particles, the energy deposit measurement should be estimated carefully.

The performance test of Cylindrical Drift Chamber (CDC) in μ -e conversion searching experiment COMET Phase-1 using cosmic ray is now on going. This presentation will make a brief talk about energy deposition inside CDC and gas gain saturation affecting energy deposition measurement.

物理学専攻
物性グループ
会場：D303
2月9日（火）

三層型銅酸化物 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ における光学反射率測定

伊藤優汰 工藤研究室 (物理学専攻)

典型的な三層型銅酸化物超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi2223) は、非等価な 2 種類の CuO_2 面を内包し、その各々でホール濃度が異なることが知られている。ホール濃度が異なる CuO_2 面はそれぞれ異なる大きさの超伝導ギャップを誘起する[1]。この 2 種類の CuO_2 面を有する Bi2223 においては超伝導ギャップや擬ギャップのキャリア濃度依存性がどのようになるか未解明の部分も多い。そこで、我々は Bi2223 における超伝導ギャップや擬ギャップのキャリア濃度依存性を解明するため、FTIR を用いた面内光学反射率測定を行った。

最適ドープ試料 ($T_c=109\text{K}$: 以下 OP109K) とアンダードープ試料 ($T_c=88\text{K}$: 以下 UD88K) の 5K から室温までの反射率スペクトルを測定した結果、それぞれ超伝導転移温度 T_c 以下で、低エネルギーにおける反射率の増大が観測された。スペクトルの増大が起こり始めるエネルギーは OP109K より UD88K の方がわずかに低く、超伝導ギャップのエネルギーがアンダードープで低くなることを示唆している。

また、それぞれの試料における反射スペクトルの温度依存性に注目すると、 T_c より高温でスペクトル形状が特異な変化を生じることが確認された。この温度依存性における変化は擬ギャップや超伝導ゆらぎと関連している可能性がある。

[1] G. Vincini, *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 144503 (2018).

鉄系超伝導体 FeSe における光学スペクトルの面内ひずみ依存性

妹尾祐輝 工藤研究室 (物理学専攻)

鉄系超伝導体 FeSe は、低温で軌道秩序が現れること、非常に小さなフェルミエネルギーに起因する特異な物性を示すことから、注目を集めている。鉄系超伝導体のバンド構造は結晶の局所構造に敏感なため、ひずみの印加は、局所構造の変化を通して物性に大きな影響を与えることが期待される。実際、面内ひずみの加わった FeSe の薄膜試料に対する角度分解光電子分光の実験により、バンド構造の系統的な変化が観測されている[1]。そのバンド構造の変化を反映して、超伝導転移温度も変化する[2]。本研究では、面内ひずみの印加に伴う電子状態の変化を調べるため、FeSe の薄膜試料に対して光学スペクトル測定を行った。

FeSe 薄膜の反射率スペクトルを、フーリエ変換赤外分光器を用い測定し、基板の寄与を解析によって取り除くことで、FeSe の光学伝導度スペクトルを導出した。強い伸長ひずみが加わった、 SrTiO_3 基板上に作製された FeSe 薄膜に対して測定を行い、結果を先行研究と比較した。本研究により、伸長ひずみの印加は、キャリア密度を減少させることが分かった。超伝導転移温度も伸長ひずみに伴って減少しており、両者には正の相関がある。また、低温の軌道秩序相では、遠赤外領域において、低エネルギー領域の伝導度が減少し、高エネルギー領域へ移動するギャップ的な振る舞いが観測された。この振る舞いは、圧縮ひずみが印加された FeSe 薄膜では見られないため[3]、伸長ひずみの印加によってバンド構造が変化し、新たなバンド間遷移が現れたことを示唆している。

[1] G. N. Phan *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 224507 (2017).

[2] F. Nabeshima *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 120314 (2018).

[3] M. Nakajima *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 184502 (2017).

ラマン散乱分光による $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{As}_2$ の 電荷ネマティック揺らぎの Mn 置換量依存性

山本俊樹 工藤研究室 (物理学専攻)

鉄系超伝導体では、面内 4 回対称性の破れた電子ネマティック状態と超伝導との関係が注目されている。本研究では、ラマン散乱分光測定により $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{As}_2$ におけるネマティック揺らぎの組成依存性を研究した。

$\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{As}_2$ では、Mn 置換量の増大とともに、 BaFe_2As_2 におけるストライプ型の反強磁性相は抑制され、相境界と考えられている Mn12%近傍から BaMn_2As_2 由来の別の反強磁性相が出現する。この領域では磁気相転移温度 T_N より高温から短距離磁気秩序相が存在するという報告もある[1]。

この $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{As}_2$ に対し、ネマティック揺らぎによる準弾性ピークが観測可能な B_{1g} モードのラマン散乱分光測定を行った。0%から 12%までの Mn 置換した試料では、 T_N 直上まで温度を下げると共に、電荷ネマティックラマン応答が観測された。その電荷ネマティックラマン応答は相境界の $x=0.12$ に向けて抑制もされている。一方、12%においては他の偏光配置でのフォノンモードが高温から観測されている。この結果は、相境界付近の高温の短距離磁気秩序の発生に伴い、微視的な結晶構造変化が誘起されていることを示唆している。

[1] D. S. Inosov *et al.*, Phys. Rev. B **87**, 224425 (2013).

ディラック電子系 NiTe_2 の Pd 置換によるバンド制御

吉野健太郎 工藤研究室 (物理学専攻)

Pd、Pt ダイカルコゲナイドは、近年 TypeII ディラック電子系であると理論的に予想され、実験的な研究により電子状態の解明が進みつつある系である[1][2]。この PdTe_2 、 PtTe_2 のディラック点は、フェルミ準位に比べてかなり深いエネルギー (約-600meV,-800meV) に位置している。これに対し、同じ第 10 族遷移金属の Ni を含む系 NiTe_2 はディラック点がフェルミ準位近傍(約+50meV)に位置していると考えられており、輸送現象などにもディラック電子特有の振る舞いが観測される新たなディラック電子系として注目されている。そこで、 NiTe_2 と PdTe_2 のディラック点がフェルミ準位に対し、約+50meV,-600meV に位置していることに着目し、これらの固溶系 $\text{Ni}_{1-x}\text{Pd}_x\text{Te}_2$ の作製とディラック点のエネルギー準位の制御を行うことを研究目的とした。

本研究では、フラックス法により作成した $\text{Ni}_{1-x}\text{Pd}_x\text{Te}_2$ の単結晶を用いて、ディラックコーンを形成しているバンドの Pd 置換量依存性を、角度分解光電子分光法 (ARPES) により研究した。その結果、Pd を 4% 置換するとディラック点がフェルミ準位よりも下に沈み込み、さらに置換量を増やすごとに、ディラック点のエネルギー準位が深くなっていく振る舞いが見られた。この結果は、 NiTe_2 に少量の Pd 置換を行っただけで、輸送現象に寄与するキャリアが正孔から電子へと急激に変化するホール抵抗の結果とも矛盾しない。以上のことは、ディラック電子系 NiTe_2 において、Pd 置換効果によりディラック点を形成しているバンドの制御が可能であることを示唆している。

[1] Fucong Fei *et al.* PHYSICAL REVIEW B, **96**, 041201(R) (2017).

[2] Huaqing Huang *et al.* PHYSICAL REVIEW B, **94**, 121117(R) (2016).

スピネル型酸化物 $Mg_{1-x}Li_xTi_2O_4$ の価数制御による スピン液体状態の発現

川畑宇矢 花咲研究室 (物理学専攻)

スピネル型酸化物 $MgTi_2O_4$ は Ti がパイロクロア格子を組む $S = 1/2$ の量子スピン系であり、260K で立方晶から正方晶へ構造相転移する^[1]。正方晶相では Ti が二量体を形成してスピニングレット状態になっている。Ti サイトの 2-in 2-out 構造によってフラストレーションも期待されるが、Ti ボンドが規則的に配置する事で長距離秩序化してしまう。これまでの研究^[2]から、Ti サイトを Mg に部分置換することで、Ti の長距離秩序が融解し、Ti 相関が非常に短くなる $Mg_{1.25}Ti_{1.75}O_4$ において、スピン液体状態の可能性が示された。私は、Ti サイトを構造的に乱さずにスピンを部分的に欠陥させる事を目的として、Mg サイトを Li に部分置換した $Mg_{1-x}Li_xTi_2O_4$ の合成を行い、スピン液体状態について研究を行った。

様々な置換領域における放射光 XRD 回折と EXAFS の実験を行い、解析を進めたことで、 $Mg_{0.92}Li_{0.08}Ti_2O_4$ は立方晶であるにも関わらず局所的に正方晶型構造が残っていることが判明した。そこで、本物質で比熱測定を行ったところ、絶縁体にも関わらず磁場依存しない電子比熱係数 $\gamma \cong 3$ (mJ/K² Ti mol) を観測し、ギャップレスなスピン液体状態の可能性が浮上した。得られた結果に基づき、近年提唱されている”ランダムシングレットモデルにおけるスピン液体状態^[3]”の可能性について議論する。

[1] M. Isobe and Y. Ueda, J. Phys. Soc. Jpn. **71**, 1848 (2002). [2] S. Torigoe *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 134443 (2018). [3] H. Kawamura and K. Uematsu, J. Phys.: Condens. Matter **31**, 504003 (2019).

狭ギャップ半導体 $CeSb_xTe_{2-x}$ の弱磁場巨大磁気抵抗効果の観測

中岡優大 花咲研究室 (物理学専攻)

$CeSb_xTe_{2-x}$ は ZrSiS 型正方晶構造の擬二次元磁性体である。 $CeSbTe(x=1)$ ではそのノンシンモルフィックな構造により線形バンド分散の多重縮退点が存在し、弱磁場で生じる磁気秩序によりその縮重度が変化することが理論計算で指摘されており、トポロジカル物質として注目を集めている[1]。一方で、 $CeTe_2(x=0)$ と $CeSbTe$ ではその特異なフェルミ面のネスティングによる電荷密度波ギャップの存在が光電子分光測定によって示唆されており、電子-格子間相互作用を反映した物性にも興味を持たれる[2][3]。

本研究では化学気相輸送法によって $x \sim 0.17$ 程度の単結晶を合成し、電気抵抗率と磁化率を測定した。その結果、室温以下で半導体的な振る舞いを示し、 $T_N = 3.63K$ で反強磁性秩序を示すことが判明した。さらにこの低温磁気秩序状態では、 c 軸方向の磁場下において 0.39T の弱磁場で電気抵抗率が 3 桁近く減少する負の巨大磁気抵抗効果を観測した。一方で、 a 軸方向の磁場下では電気抵抗率は高い値のまま、ほぼ変化しなかった。この巨大磁気抵抗効果について磁場方位依存性を詳細に測定した結果、電気抵抗率の劇的な変化は磁化容易軸である c 軸方向の磁気モーメントが揃う寸前で起こることが判明した。

[1] Schoop, L. M., *et al.*, Sci. Adv. **4**, eaar2317 (2018).

[2] J.-S. Kang, *et al.*, Phys. Rev. B **85**, 085104 (2012).

[3] Peng, Li, *et al.*, arXiv:2011.11267v1 (2020).

ファンデルワールス強磁性体 CrGeTe₃ の元素置換による

電気・熱輸送特性と強磁性転移の制御

真栄城 竜生 花咲研究室 (物理学専攻)

p型半導体の CrGeTe₃ 結晶は層状構造を持ち、層間はファンデルワールス力によって弱く結合している。クーロン相互作用により Cr³⁺は局在し、65 K で強磁性転移を起こすことが知られている。近年、本物質は熱電材料として着目されており、833 K において無次元性能指数 $zT=0.3$ という比較的高い値を示し、更に Mn 置換によって正孔ドーピングを行うことで zT が2倍以上増加することが報告された[1]。しかしながら、多結晶置換体の室温でのキャリア濃度は 10^{18} cm^{-3} 程度であり、半導体熱電材料の理論的最適値より一桁小さい。このことから、単結晶において面内方向の高い電気伝導性を活かした上で、幅広い元素置換を通じたキャリア濃度の最適化を行うことで、熱電性能が更に向上することが期待される。一方、本物質はファンデルワールス強磁性体としても注目されており、インターカレーションにより電子ドーピングすることで強磁性転移温度が大幅に上昇したという報告例がある[2]。しかし、元素置換を用いた本物質の磁性に関する先行研究は無く、元素置換によりファンデルワールス結合を保持したまま磁性の制御を行うことが出来れば、原子層強磁性体への応用も期待される。

そこで本研究では、単結晶 CrGeTe₃ の輸送特性と磁性を元素置換によって制御することを試みた。具体的には、Cr を Mn や Cu で置換することで正孔ドーピングを行い、電気伝導率の向上による熱電性能の上昇と強磁性転移温度の制御を試みた。この結果、単結晶 CrGeTe₃ にキャリアドーピングすることで低い電気伝導率を改善し、電力因子を多結晶の母物質から8倍近く上昇させることに成功した。また、キャリア濃度が母物質と比較して約100倍増加した系は金属へと転移し、強磁性転移温度が212 K にまで上昇することを発見した。

[1] Dingfeng Yang, *et al.*, *Chemistry of Materials* **28**, 1611 (2016)

[2] Naizhou Wang, *et al.*, *Journal of The American Chemical Society* **141**, 17166 (2019)

深層ニューラルネットワークの学習過程における内部構造の変化

高橋真夏 菊池研 (物理学専攻)

現在広く使われている機械学習のアルゴリズムの一つに深層ニューラルネットワーク (Deep Neural Networks) があるが、計算の高速化や効率よく学習する手法については研究が進んでいる一方で、高い汎化性能——未知のデータに対して正しい性質を推測する能力——が得られる理由や、ネットワークの内部構造が学習中にどう変化していくかについては解明されていない部分が多い。

本研究では、全く同じ構造を持つ親ネットワークと子ネットワークのペアを用いることで、学習を解析する。まず親ネットワーク P を用意する。次に、ランダムに、または親 P のパラメータに小さな摂動を加えて初期化した子 C を用意する。そして、C を P について学習、すなわち P の入出力関係を再現できるように C のパラメータを最適化することで、学習過程で P, C 間の内部構造の類似度がレイヤー番号などに依ってどう変化していくかや、摂動を加えても高い類似度が保持されやすい条件 (頑健性 (robustness) の獲得条件) について議論する。また、P をランダム初期化した場合と何らかのデータに関して予め学習しておいた場合を比較することによっても、学習の効果を議論する。活性化関数 (activation function) としては符号関数 $\text{sign}(x)$ を連続化した $\tanh(ax)$ を使い、様々な非負実数パラメータ a について計算を行うことで、活性化関数の鋭さによる振る舞いの変化についても議論する。

高ランクテンソル分解モデルの Belief propagation に基づく解析

長澤莉希 菊池研究室 (物理学専攻)

ノイズの乗った観測から元のデータを復元するために、推定の問題が研究されている。統計的推定と統計物理学との類似性から、物理的観点からのアプローチもなされてきた。特に、符号分割多元接続 (CDMA) などの線形観測に基づいた推定がよく知られている。ある種の一般化として、SpVP [1] などが p 体観測によるベクトル推定を提案している。SpVP モデルでは、相加的ノイズが加わった、密だが全結合より疎な p 体観測に基づいて、 $M (\gg 1)$ 成分ベクトルの推定を行う。既にレプリカ法を用いた解析によって、推定の平均性能評価が行われている。

我々は今回、Belief propagation (BP) を用いた解析を行うために、相互作用にランダム行列を導入して SpVP モデルを修正した。これを高ランクテンソル分解モデルと呼んでいる。ランダム行列によって、BP の収束性を改善することができた。 $M \rightarrow \infty$ の極限で、BP に基づくアルゴリズムを導出し、状態発展法を用いてメッセージのマクロな振る舞いを調べた。この解析は Cavity 法に対応し、レプリカ法による解析結果が再現される。得られたアルゴリズムを用いることで、実際に推定を行うことができる。

具体的にデータやノイズの形をいくつか仮定し、それぞれの場合について有限サイズ系に対する数値計算を行なった。その結果、ほぼ理論的に期待される誤差範囲の推定に成功することが確かめられた。

高ランクテンソル分解モデルを誤り訂正符号に用いれば、 $p \rightarrow \infty$ の極限で有限の情報伝送速度を保ちつつ Shannon の限界を満たす符号化になる。さらに、関連する他の統計的推定や制約充足問題にも適用できると期待される。

[1] 横井, 吉野. 疎な観測による p 体ベクトル推定問題. 日本物理学会講演概要集, 73.1:2670-2670, 2018.

室温強磁性を示す遷移金属酸化物を用いたスピン流特性の検出

大河内 真哉 松野研究室 (物理学専攻)

巨大磁気抵抗効果 (GMR) やトンネル磁気抵抗効果 (TMR) の発見とともに、スピン自由度に起因する輸送現象に注目が集まるようになった。中でも、電子のスピン角運動量の流れであるスピン流は現在のスピントロニクスにおける重要テーマであり、スピン流に関する様々な輸送現象が発見されてきている。その一つであるスピンホール効果 (電流とスピン流の変換現象) を利用することで、スピン—軌道相互作用の大きな物質で生じたスピン流を磁性物質に注入してスピンホール磁気抵抗効果 (SMR) を発現させることができる。このような界面磁気抵抗効果を研究する舞台として、室温で強磁性を示す遷移金属酸化物に着目した。室温動作デバイスへの応用が期待できることに加えて、エピタキシャル薄膜の合成によりスピン流物性をより微視的に理解できる利点がある。

本研究では、室温強磁性金属としてよく知られている $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ [1] と $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_3$ (LBMO) [2] を候補物質として選択し、パルスレーザー堆積法により両物質ともに高い結晶性を持つエピタキシャル薄膜を作製した。中でも LBMO 薄膜の強磁性転移温度は ~ 300 K と室温よりわずかに高かったため、LBMO 薄膜上にスピン—軌道相互作用の大きい Pt のホールバーをメタルマスク越しに成膜することで二層膜 LBMO/Pt を作製した。磁場中での試料回転により、強磁性体薄膜の磁化の向きによって電子の散乱度合いが変化する異方性磁気抵抗効果 (AMR) と SMR を測定した。この結果、従来のモデルでは説明できない AMR の符号反転と、Pt を用いた金属二層膜の先行研究より一桁程度大きい SMR 比 ($\sim 2\%$) が観測された。この結果は、Pt と強磁性酸化物との界面が新奇なスピン流物性を開拓する格好の舞台であることを示唆している。

[1] K.-I. Kobayashi *et al.*, Nature **395**, 677 (1997). [2] R. von Helmolt *et al.*, PRL **71**, 2331 (1993).

Y₃Fe₅O₁₂/非磁性導電体の界面状態とスピン流注入効率との相関解明

福島健太 松野研究室 (物理学専攻)

近年、電子のスピン角運動量の流れであるスピン流を用いた磁化制御が注目されており、その中でも磁気抵抗変化率の向上が大きな課題となっている。その舞台となるのは非磁性層と磁性層を組み合わせた二層膜であり、非磁性層において生成されたスピン流の一部は界面を透過し磁性層の磁化に作用する。抵抗変化率の向上には大きなスピン流生成効率を持つ非磁性体が重要であり、スピン-軌道相互作用の大きな重金属を中心に最近では導電性酸化物など幅広い物質探索が行われている。もう一つの重要な因子は非磁性層と磁性層との界面におけるスピン流注入効率向上である。この効率は物質の組み合わせや結晶状態、測定手法によって二桁近くばらつきがあり、界面状態とスピン流物性との関係性解明が求められている。

本研究では界面状態に依存するスピン流物性の理解を目的とし、磁性層に酸化物絶縁体 Y₃Fe₅O₁₂ (YIG)、非磁性層に重金属 Pt と導電性酸化物 IrO₂ を用いた二層膜 YIG/Pt および YIG/IrO₂ に着目した。IrO₂ は Pt と同程度のスピン流生成効率を示す一方で [1]、隣接する磁性体が絶縁体の場合 [2]には金属の場合 [3]よりスピン流注入効率が著しく小さいことが報告されている。スピン流注入効率を定量的に評価するために、スピンホール磁気抵抗効果 (SMR) を測定した。その結果 YIG/Pt では YIG の飽和磁化・表面粗が SMR と相関することが判明し、スピン流注入効率が界面状態に大きく依存する物理量であることが明らかとなった。一方 YIG/IrO₂ では YIG/Pt と比べて極めて低いスピン流注入効率が観測された。このことは酸化物界面が従来の見識では説明できない重要な研究対象であることを意味している。

[1] Fujiwara *et al.*, Nat. Commun. **4**, 2893 (2013).

[2] Qiu *et al.*, Appl. Phys. Express. **8**, 083001 (2015).

[3] Ueda, Moriuchi, Fukushima *et al.*, Phys. Rev. B. **102**, 134432 (2020).

二層膜 IrO₂/CoFeB における電流-スピン流変換効率

森内直輝 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を用いた磁化制御は、電子機器の省電力化をもたらすことからスピントロニクス of 重要な課題となっている。スピン流は強いスピン-軌道相互作用を有する非磁性金属に電流を流すことで誘起され (スピンホール効果)、このスピン流を隣接する磁性層に吸収させることで磁化を制御できる。これまで非磁性金属として Pt と Ta を代表とする 5d 遷移金属が広く使われてきたが、より効率的な磁化制御に向けて高い電流-スピン流変換効率を持つ新規材料が求められている。

本研究では高い変換効率を持つ物質の候補として 5d 遷移金属酸化物である IrO₂ に着目し、スピン流物性の探索を行った。5d 遷移金属酸化物では強いスピン-軌道相互作用を持つ 5d 電子のみが伝導に寄与するため、5d 電子に加えてスピン-軌道相互作用を持たない 6s 電子も伝導に寄与する 5d 遷移金属とは定性的に異なるスピン流物性が期待される。そこでスパッタ法で二層膜構造の IrO₂/強磁性体 CoFeB 及び参照試料(Pt, Ir, W)/CoFeB を製膜し、フォトリソグラフィでデバイス加工を行った。変換効率の評価のため第二高調波ホール抵抗の角度依存性と縦抵抗の角度依存性を外部磁場下でそれぞれ測定した。その結果、IrO₂ の電流-スピン流変換効率は Pt と同程度の大きさを示し、異なる強磁性体を用いた二層膜 Py/IrO₂ の先行研究と一致した[1]。強磁性層を二種類の非磁性層で挟んだ三層膜構造 IrO₂/CoFeB/(Pt, Ir)についても同様の測定を行い、Pt と Ir の挿入により変換効率が制御可能であることを示した。これらの結果から、IrO₂ が大きなスピン流生成を実現する新奇な酸化物材料であり、その特異な電子構造がスピン流物性に重要な役割を果たすことが明らかとなった。

[1] K. Ueda, N. Moriuchi, K. Fukushima *et al.*, Phys. Rev. B **102**, 134432(2020).

共鳴スピン分解電子エネルギー損失分光法の開発

川畑 太嗣 光物性研究室 (物理学専攻)

固体の機能性の起源の電子構造を観測する最先端の方法として、角度分解光電子分光 (ARPES) や共鳴非弾性 X 線散乱 (RIXS) や非弾性中性子散乱 (INS) があり、それぞれ準粒子やマグノン・フォノンなどの固体中の素励起を主に観測できる。これらの手法では観測することが難しい素励起として電荷の集団励起であるプラズモンがある。プラズモンを直接観測する手法として電子エネルギー損失分光 (EELS) が知られているが、現在主に用いられている 100eV 以下の電子線を使う高分解能 EELS (HR-EELS) と透過電子顕微鏡による 100keV 以上の電子線を使った TEM-EELS では、元素選択的な測定は原理上難しい。そこで本研究では、遷移金属の L 端や希土類の M 端に相当する軟 X 線領域 (0.3-1.5 keV) で電子エネルギーを変えて、内殻共鳴を使った元素選択的 EELS (rEELS) を行うことを目的として装置開発を行った。さらに本装置では、電子源に 80%以上偏極度を持つスピン偏極電子を放出できる GaAs/GaAsP 歪超格子多層膜フォトカソードを使用し、高いエネルギー分解能 ($\Delta E \sim 100\text{meV}$) とエネルギー可変性、高いスピン偏極電子を併せ持った、共鳴スピン電子エネルギー損失分光法を開発した。発表では、装置開発の現状と共鳴 EELS およびスピン分解 EELS の測定結果について報告する。

光誘起価数転移を示す SmS の電子状態

柴田友里亜 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(Black Insulator)から金色金属(Golden Metal)へと価数変化を伴う相転移 (BG 転移) を示す物質である[1,2]。この相転移の詳細なメカニズムは明らかにされていなかったが、最近になって励起子不安定性が BG 転移の起源の一つとして提案された[3]。本研究では、光によって直接生成された励起子が価数転移を引き起こすかどうかを調べるために、光照射による励起子生成を行い、光励起前後での価数変化を時間分解 X 線吸収分光(tr-XAS)、電子状態変化を赤外分光で観測したので報告する。

図 1 に、光照射前後における SmS の Sm 3d_{5/2} 内殻の XAS スペクトルを示す。光照射前のスペクトル (●) では、Sm²⁺(1077 eV)と Sm³⁺(1080 eV)のピークが観測されており、Sm²⁺だけではなく、わずかに Sm³⁺が混在した中間価数状態(2.32 価)であることが分かった。一方で、光照射後のスペクトル (■) では、Sm³⁺ピークが Sm²⁺のピークに比べて相対的に大きくなり、平均価数は 2.46 価と見積もられた。以上の結果は、光照射によって、SmS の価数が増加し、BG 転移の兆候が表れていることを示している。時間分解赤外分光では、光励起によるエキシトン生成が観測された。これらの本研究で得られた結果により、励起子の存在が BG 転移にかかわっていることが裏付けられた。

[1] A. Jayaraman *et al.*, PRL **25** 1430 (1970).

[2] K. Matsubayashi *et al.*, JPSJ **76**, 064601 (2007).

[3] T. Mizuno *et al.*, JPSJ **77**, 113704 (2008).

テラヘルツ波領域における人工光合成系物質の分子間振動の観測

飛鳥樹喜 木村研究室 (物理学専攻)

近年、環境保全の観点から環境負荷の小さい新たな再生可能エネルギー源として人工光合成現象が注目されている。人工光合成現象とは、主に光触媒などに光照射を行うことで、植物が行う光合成と同様に、二酸化炭素を一酸化炭素へと変換する現象を指す。本研究では、人工光合成物質の中でも2つの金属錯体、 $[\text{Ru}^{\text{II}}(\text{bpy})_3](\text{PF}_6)_2$ (以下 RuH)、 $[\text{Os}^{\text{II}}(\text{bpy}(\text{CH}_3)_2)_3](\text{PF}_6)_2$ (以下 OsMe) について着目した。RuH, OsMe 錯体は構造が非常によく似ているにもかかわらず、一電子還元種に対する量子効率 Φ_{OER} が70倍以上も異なる。この理由として、電子移動が起こる還元剤と金属錯体間の距離に違いがあることや、中心金属の重原子効果などが考えられているが、現在のところ明らかになっていない。そこで本研究では、これらのうち、還元剤と金属錯体間の電子移動について調べることを目的とした。具体的には、RuH, OsMe 錯体と還元剤 BIH 間の分子間振動モードの違いをテラヘルツ波全反射減衰分光法 (THz-ATR) により調査した。その結果、RuH-BIH 間の分子間振動モードが 0.66 THz に存在する一方で、OsMe-BIH 間では 0.3 THz 以下に移動することを観測した。これらの金属錯体と還元剤間の分子間振動モードの周波数の比から、OsMe 錯体と BIH 間の距離は RuH 錯体-BIH 間より2倍程度離れていることがわかった。この分子間距離の差によって、RuH, OsMe 錯体と還元剤 BIH 間の電子移動に違いが生じ、そのことが要因の一つとして70倍以上異なる量子効率の差が発生しているものと結論付けた。

パルス強磁場 ESR の偏光角度依存性測定装置の開発

西井健剛 萩原研究室(物理学専攻)

物質の中で(反)強磁性と(反)強誘電性がカップルしたマルチフェロイック物質では、印加する一様磁場、誘起される磁化、電気分極、そしてそれらと入射する光の偏光方向の関係が特定の幾何学的条件を満たす時のみ、振動電場による特異な磁気励起であるエレクトロマグノンが観測される場合がある。我々の研究室では、オケルマナイト型の構造を持つマルチフェロイック物質 $\text{Sr}_2\text{CoGe}_2\text{O}_7$ に対する電子スピン共鳴(ESR)測定を行い、磁化飽和後の磁場領域においてエレクトロマグノンが観測されることを見出した[1]。また観測されたすべての共鳴モードに偏光角度依存性があることがわかった。本研究では、 $\text{Sr}_2\text{CoGe}_2\text{O}_7$ において観測されている ESR シグナルの偏光角度依存性を定量的に評価することによって磁気励起の微視的な起源をより詳細に明らかにするために、入射するテラヘルツ波の偏光角度を任意に調整出来る回転機構を備えたパルス強磁場 ESR 測定装置の開発を行った。

従来の ESR 測定システムでは、偏光子を回す度に導波路を含むプローブを取り出してセットアップをやり直す必要があり、共鳴シグナルの偏光角度依存性を定量的に評価することが困難であった。そこで今回、プローブを取り外すことなく外部からプーリーを介して偏光子を回転できる機構を備えた新しい測定プローブを開発した。そして 4.2 K の極低温下においても 180° 以上の角度範囲でプーリーの回転を制御できることを確認した。また、開発した装置の ESR 測定の性能を確認するために、 $\text{Sr}_2\text{CoGe}_2\text{O}_7$ の ESR シグナルの印加磁場方向依存性測定を行った。

[1] M. Akaki *et al.*, Phys. Rev. B, **96**, 214406 (2017).

LC 共振回路を用いた強磁場・高圧力下磁化測定装置の開発及び フラストレート量子磁性体への応用 二本木 克旭 萩原研究室 (物理学専攻)

LC 共振回路内のコイルに内包した磁性絶縁体に磁場を印加した際、共振周波数の変化は、その試料の磁化率の変化に比例する。この手法(LC 共振法)では、コイルに対する試料充填率が測定感度に関わる重要な因子であり、微小試料でも十分な測定ができるため、試料空間の狭い圧力セルとの相性が良い。本研究では、50 T 級非破壊型パルスマグネットと NiCrAl 合金製ピストンシリンダー型圧力セル(内径 2.0 mm、外径 8.6 mm)を組み合わせた LC 共振法によるパルス強磁場・高圧力下磁化測定装置の開発を目的とした。検出コイルの配線は、スタイキャスト樹脂とコーン型の蓋を用いて封止し、最高で 2 GPa の圧力発生を可能にした。装置の性能を評価する試料には、圧力誘起磁気相転移を示すフラストレート量子磁性体 CsCuCl₃ を用いた。CsCuCl₃ は、 $T_N=10.5$ K 以下で量子スピン揺らぎと容易面異方性の競合により、強磁場中で量子効果を反映した磁性を示す[1]。1.4 K、*c* 軸方向の磁化では、 $H_c=12.5$ T で umbrella 構造から、2-1 coplanar 構造に磁気転移し、 $H_{sat}=30$ T で飽和に至る。また、約 0.7 GPa 以上で H_c 直前に up-up-down(uud)構造の出現も報告されている[2]。本測定においても常圧下の周波数応答の磁場依存性に、 H_c 、 H_{sat} の磁気転移に対応する変化を観測した。さらに、 H_{sat} 直前で新たな相転移に対応する変化を観測した。圧力下では、0.7 GPa 以上で、uud 相に対応する変化が観測され、最高圧力 1.72 GPa までの飽和に至るまでの全磁気相の圧力依存性を明らかにした。 H_{sat} は、圧力増加とともに、高磁場側に移動し、1.72 GPa で 40 T まで増加した。本研究で得られた磁場圧力相図は、理論相図[3]と定性的に一致した。

[1] T. Nikuni and H. Shiba, JPSJ **62**, 3268 (1993). [2] A. Sera *et al.*, PRB **96**, 014419 (2017).

[3] M. Hosoi *et al.*, JPSJ **87**, 075001 (2018).

⁴He を用いた 1 K 以下極低温におけるパルス強磁場磁化測定装置開発と ダイヤモンド格子反強磁性体 MnSc₂S₄ の強磁場物性 松崎大亮 萩原研究室 (物理学専攻)

一般に、1 K 以下の極低温を実現させるためには ³He が使用されている。しかし、³He は ⁴He に比べ非常に希少で高価であることから、我々はパルス強磁場下において 1 K 以下の磁化測定を行うことができる ⁴He のみを使用した極低温装置の開発を行った。通常の ⁴He 減圧に用いるキニーポンプに加え、より到達真空度が高く、排気速度も大きい油噴射拡散ポンプを配した 2 段式の減圧システムを新たに導入することで、最低温度 0.95 K の到達に成功した。そしてこのシステムに組み込むための新しい磁化測定プローブを開発し、フラストレート磁性体 MnSc₂S₄ に対する磁化測定実験を行った。開発した磁化測定プローブでは、MnSc₂S₄ が示す微弱な磁化信号をとらえるために、検出コイルの内径を試料の寸法にあわせて小さくすることで充填率を高め、さらに通常より線径が小さい銅線を用いて巻き数を増やすことで信号強度の増強を図っている。対象とする MnSc₂S₄ は、Mn²⁺イオン(S=5/2)がダイヤモンド格子を形成している立方晶の磁性体である。約 1.5 K 以下の極低温で[001]方向に約 3 T 以上の磁場を印加すると、3 つの波数ベクトル(Triple-*q*)で記述される渦状の特異な磁気構造が発現することが中性子回折実験によって確認されている[1]。さらに最近我々は、[001]方向の極低温強磁場磁化測定によって、Triple-*q* 相の上部臨界磁場と飽和磁場の間に新たな磁気相が存在する事を、微分磁化 dM/dH の異常として確認した[2]。今回新たに、[111]方向に対して磁化測定を行ったところ、[001]方向とほぼ同じ磁場において dM/dH の異常を観測した。

本発表では、開発した極低温磁化測定装置の詳細を紹介するとともに、 dM/dH の温度依存性を用いて作成した *H-T* 相図に基づいて、MnSc₂S₄ の磁気状態について議論する。

[1]Shang Gao *et al.*, Nat. Phys., **13** 157 (2017)

[2]佐藤和樹 他, 日本物理学会 2019 年秋季大会,11pD11-12.

物理学専攻
物性グループ
会場：D303
2月10日（水）

ファンデルワールス強磁性体を用いた 原子層ヘテロ接合デバイスの作製と物性評価

太田 智陽 小林研究室 (物理学専攻)

グラフェンを代表とする原子層物質は、低次元系の格好の舞台として精力的に研究されている。近年では、強磁性や超伝導などの相転移を示す原子層物質も報告されており[1,2]、多彩な物性を利用した研究が展開されている。特に、それらを重ね合わせた原子層ヘテロ接合は、物質の組み合わせ次第で、様々な機能を持った系を自由にデザインできるため、原子層デバイスとしての応用が期待される。

そこで本研究では、強磁性体と超伝導体を重ね合わせることで、磁性と共存する非従来型の超伝導状態の創出を目指した。原子層ヘテロ接合の作製に当たって、まず原子層強磁性体である Fe_5GeTe_2 と原子層超伝導体である NbS_2 に関して、薄膜デバイスを作製し、電気輸送測定手法の確立を行った。その後スタンプ法を用いて、原子層物質による強磁性/超伝導ヘテロ接合を作製した(図 1)。

作製したヘテロ接合デバイスのホール抵抗や縦抵抗の温度依存性を調べたところ、 Fe_5GeTe_2 と NbS_2 単体の部分はそれぞれ強磁性と超伝導を保ったまま、清浄な接合界面が実現していることを確認した。

当日は Fe_5GeTe_2 及び NbS_2 薄膜デバイスの物性評価の結果と、接合系の輸送特性に関して報告する。

[1] T. Ohta *et al.*, Appl. Phys. Express **13**, 043005 (2020).

[2] R. Yan *et al.*, Appl. Phys. Express **12**, 023008 (2019).

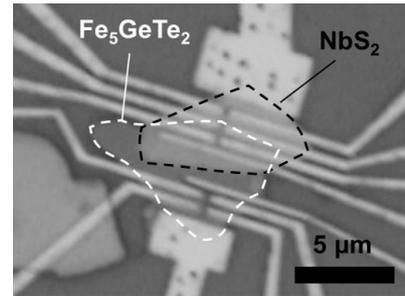


図 1: 実際に作製した $\text{NbS}_2/\text{Fe}_5\text{GeTe}_2$ 接合デバイスの光学顕微鏡像。下側: Fe_5GeTe_2 、上側: NbS_2 。

$\text{Fe}_3\text{GeTe}_2/\text{WTe}_2$ 接合におけるトポロジカルホール効果の観測

坂井康介 小林研究室 (物理学専攻)

連続変形で変化しない性質を示す数学的な概念“トポロジー”は、トポロジカル物質を始めとした新しい研究分野開拓の糸口となった。トポロジーを磁性体中の磁化ベクトルに持ち込んだ磁気スキルミオンの研究もその一例である。磁気スキルミオンの発見後、様々な物質で磁気スキルミオンの探索が行われ、磁気スキルミオンによる創発磁場特有のトポロジカルホール効果が観測された[1]。また、ローレンツ電子顕微鏡を用いて磁気スキルミオンの直接観測が行われ、超低電流密度 ($10^6 \sim 10^8 \text{ A/m}^2$) での磁気スキルミオンの駆動が確認されたことで[2]、低消費電力の磁気メモリデバイスとしての応用も期待されている。

本研究では、垂直磁気異方性をもつ原子層強磁性体 Fe_3GeTe_2 と、スピン軌道相互作用の強い原子層半金属 WTe_2 を用いて、原子層ヘテロ接合デバイスを作製し、トポロジカルホール効果の観測を目指した。本研究で採用したスタンプ法を用いれば、通常の成膜では作製が困難な格子定数の大きく異なる物質同士を、原子レベルに平坦な面で接合させることが可能である。また元々薄膜であるため、ローレンツ顕微鏡を用いた磁気スキルミオンの直接観測とトポロジカルホール効果を関連付けて研究することも可能になる。本研究では、作製した $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2/\text{WTe}_2$ ヘテロ接合デバイスでトポロジカルホール効果の測定を行ったので、その詳細を報告する。

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

[2] Jonietz, F. *et al.*, Science **330**, 1648–1651 (2010).

エッチンググラフェンにおける弱局在効果の変調

花田 尚輝 小林研究室 (物理学専攻)

グラフェンは炭素原子からなる蜂の巣構造の2次元物質である。近年、グラフェンに酸素及び水素プラズマを照射して、グラフェンをエッチングすることで、物性を変化させる試みがなされている。例えば、エッチングによって原子1個から数個の点欠陥を導入することで、近藤効果や強磁性などの従来のグラフェンでは見られない現象が発現する[1,2]。またエッチングによって、グラフェンの端の形状を制御することができ、ジグザグ型の端ではグラフェン端状態と呼ばれる特異な電子状態が現れる[3,4]。

このような点欠陥や試料端の制御に加えて、エッチングのパワーや時間を制御すれば、数百 nm から数 μm の大きさの欠陥も導入できる。この欠陥のサイズは、電子の干渉性が保たれる長さ「位相緩和長」と同程度である。従って、エッチングはグラフェンの量子輸送測定に影響を与えると考えられる。こうした干渉性が顕著に表れる現象が弱局在効果であり、系の位相緩和長を求めるプローブとなる。グラフェンにおける弱局在効果は、すでに先行研究[5]で理解されているが、エッチングを行ったグラフェンについての知見は十分でない。

そこで本研究では、エッチングを行ったグラフェンに対して、弱局在効果の測定を行った。得られた弱局在結果から、位相緩和長及び、グラフェンに特有な散乱長である谷間散乱長、谷内散乱長を見積もり、これらの特徴量がエッチングによってどのように変化するのかを明らかにした。

[1] J. Chen, *et al.*, *Nat. Phys.* **7**, 535 (2011). [2] Y. Zhang, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 166801 (2016). [3] M. Fujita *et al.*, *J.Phys.Soc.Jpn.* **65**, 1920 (1996). [4] Y. Niimi *et al.*, *Phys. Rev. B* **73**, 085421 (2006). [5] E. McCann *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 146805 (2006).

表面弾性波照射により変調される超伝導 NbSe₂ 薄膜の

電気輸送特性と表面弾性波の波長依存性

藤原聖士 小林研究室 (物理学専攻)

2004年に炭素原子一層からなるグラフェンが発見されたことを契機に、2次元性の強い層状物質の研究が飛躍的に発展した。このような低次元系では、電界を用いたキャリア数制御や、超伝導・磁性などの秩序相や相転移温度など、幅広い物性制御が可能となる。

さらに近年、原子層物質を動的に制御する方法として、表面弾性波を用いる手法が活発に研究されている[1]。表面弾性波とは、固体表面における弾性波であり、圧電性を有する基板上に作製した楕形電極に高周波数の交流電圧を印加することで誘起できる。この手法を用いて横井らは、超伝導状態にある NbSe₂ 薄膜に表面弾性波を照射したところ、電気抵抗の値が負になることを報告した[2]。Nb 及び NbS₂ 薄膜超伝導を用いた比較実験から、負の抵抗の発現には、NbSe₂ だけで生じる電荷密度波と超伝導の共存状態が重要な役割を果たすことが分かっている。一方、NbSe₂ 薄膜素子において、表面弾性波の波長や膜厚がどのような条件を満たすときに負の抵抗が発現するのかなど、詳細なメカニズムは未だ解明されていない。

そこで本研究では、表面弾性波の波長を変化させた素子における輸送特性を測定することで、負の抵抗の起源を実験的に検証することを試みた。本発表では、作製した素子や測定結果の詳細について報告する。

[1] G. R. Nash *et al.*, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(35):353001, Chapter 9 (2019). [2] M. Yokoi, S. Fujiwara, T. Kawamura, T. Arakawa, K. Aoyama, H. Fukuyama, K. Kobayashi and Y. Niimi, *Sci. Adv.* **6**, 34, eaba 1377 (2020).

Electrical detection of spin dynamics in van-der-Waals antiferromagnetic materials

Mori Watanabe Kobayashi Group (Department of Physics)

Van-der-Waals (vdW) materials are atomically layered materials which can be fabricated to thin films through peeling with scotch tapes. In 2017, a ferromagnetic vdW material was found to retain its ferromagnetism down to a single atomic monolayer [1], which has sparked interest for vdW ferromagnets in the field of magnetism. Meanwhile, exploration of vdW antiferromagnets (AFMs) are also highly desired. This is due to the fact that fluctuations of magnetic moments are enhanced in lower dimensions, and unique magnetic properties owing to these fluctuations are known to occur in AFMs. In the present research, the author focused on a vdW AFM that is CeTe₃. In this material, doping of Se leads to a hard-axis magnetic ordering, indicating that magnetic fluctuation has a large role in its magnetic ordering [2]. However, no thin film measurements had been performed on CeTe₃. In the presentation, the author will report on the magnetotransport measurements of CeTe₃ thin films.

Additionally, a method to evaluate the magnetic fluctuations of vdW AFM thin films are required for a detailed study. Since the thin films are usually nanoscale, conventional methods prove difficult to detect the magnetic dynamics. A promising candidate for evaluation of magnetic fluctuations in nanoscale devices are the use of spin currents. Spin current measurements in magnetic materials could allow formulation of a quantitative relationship between spin current and magnetic moment fluctuations. The author will also report spin current measurements in a spin glass material AuFe.

[1] B. Huang *et al.*, Nature **546**, 270 (2017).

[2] R. Okuma *et al.*, Sci. Rep. **10**, 15311 (2020).

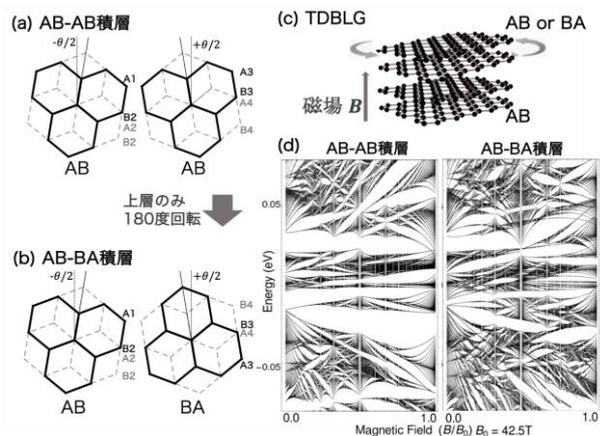
ツイスト二重二層グラフェンにおける ホフスタッターの蝶と量子ホール効果

中辻 直斗 物性理論 越野幹人研究室 (物理学専攻)

近年、ツイスト二層グラフェン(TBG)をはじめとするモアレ積層系が、盛んに研究されている。この物質は異なる周期を持つ複数の2次元物質を積層したもので、それらの結晶周期が干渉し、長距離周期を生じる。TBGは単層グラフェン2枚を回転させて重ねた系であるが、AB二層グラフェン2組を回転積層させた「ツイスト二重二層グラフェン(TDBLG)」でも超伝導や磁場中のホフスタッターの蝶と呼ばれる特異なスペクトルが観測されており、活発に研究されている。

TDBLGにはABAB積層とABBA積層が存在し(図a~c)、この2つはゼロ磁場中で非常に似たバンド構造を持つ一方で、そのトポジカルな性質が異なることが最近明らかにされた。一方でTDBLGの磁場中スペクトルの理論計算はなされていなかった。

本研究ではABAB積層、ABBA積層の2つのTDBLGについて、磁場中のエネルギースペクトルとホール伝導度を計算した。ゼロ磁場においてこの2つは極めて近いバンド構造を持つにも関わらず、磁場中のスペクトル構造、ホール伝導度には顕著な違いが現れる(図d)。この違いが2つの積層の対称性およびバンドトポロジーの違いから生じていることを示した。

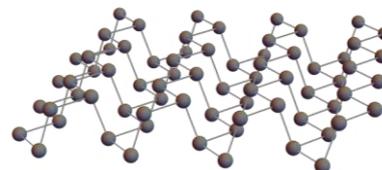


図：(a), (b), (c) TDBLG の結晶構造と
(d) TDBLG の磁場中スペクトル。

単層黒リンのエッジおよびコーナー状態

人見将 越野研究室 (物理学専攻)

単層黒リンはリン原子が2次元的に並んだ2次元物質の1種であり実際に合成されている^[1]。結晶は歪んだ六角構造を持っており(図)、ある1方向を切断した有限系では端に局在した特異な電子状態が出現することが理論計算によって指摘されている^[2]。これはエッジ状態と呼ばれる現象で、一般にバルクのトポロジカルな性質によって理解される場合が多い。しかし単層黒リンのエッジ状態のトポロジカルな特徴に対しては一部の切断に対する考察^[3]があるのみで、系統的な議論は十分になされていない。また、2方向の切断によって現れる角への局在状態(コーナー状態)についても十分な解析は行われていない。



本研究では第一原理計算を再現する多軌道模型を用いてエッジ状態およびコーナー状態を系統的に計算し、電子分極(ワニエ中心)によってそのトポロジカルな起源を明らかにした。特に多軌道バンドを単一軌道に分解する有効模型を提案し、切断方向に依存して異なる軌道に由来する様々なエッジおよびコーナー状態の出現を明快に説明した。

[1] H. Liu, et. al., ACS Nano 8, 4, (2014).; [2] X. Peng, et. al., J. Appl. Phys. 116, 144301 (2014).; [3] M. Ezawa, New J. Phys. 16 115004 (2014).

複合アニオン系 Ruddlesden-Popper 型化合物における非従来型超伝導の 発見可能性に関する理論的探究

北峯尚也 黒木研究室 (物理学専攻)

これまで、bilayer Hubbard 模型や2本鎖梯子型 Hubbard 模型における超伝導に関する理論研究が盛んに行われてきた。前者では面内のホッピングに対して層間のホッピングが大きい場合に、後者では leg 方向のホッピングに対して rung 方向や斜め方向のホッピングが大きい場合に、強いペアリング相互作用と重すぎない準粒子の両立が可能であり、超伝導に有利である。これらの模型に対して揺らぎ交換近似を適用すると、銅酸化物高温超伝導体の模型と考えられる2次元正方格子 Hubbard 模型の数倍もの超伝導転移温度 T_c が得られる^[1]。そこで、このような bilayer 型および梯子型の電子状態を持ち、高温超伝導を実現する物質を理論的に予測することは、この分野における一つの課題であるといえる。

本研究では、1層、および2層の複合アニオン系 Ruddlesden-Popper 型化合物における超伝導の可能性を、揺らぎ交換近似を用いて調べた。1層系では bilayer Hubbard 模型と2軌道正方格子 Hubbard 模型の数学的な等価性に着目し、ニッケル化合物を超伝導体の候補として考えた。そしてニッケルの $3d_{x^2-y^2}$ 軌道とその他の $3d$ 軌道のエネルギー準位差を大きくすることが、bilayer Hubbard 模型において層間のホッピングを大きくすることに相当し、超伝導性を強く増強させることが分かった^[2]。また2層系については酸水素化物を考え、水素の存在によって理想的な bilayer 型および梯子型の電子状態が実現し、高い T_c を示し得ることを見出した。

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

[2] N. Kitamine *et al.*, Phys. Rev. Research **2**, 042032(R) (2020).

新タイプの銅酸化物高温超伝導体 $\text{Ba}_2\text{CuO}_{3+\delta}$ の多軌道模型に基づく理論研究

山崎公裕 黒木研究室 (物理学専攻)

近年, Li らによって新たな銅酸化物高温超伝導体 $\text{Ba}_2\text{CuO}_{3+\delta}$ が報告された [1]. この物質の超伝導転移温度 T_c は約 70 K と非常に高く, さらに従来の銅酸化物高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 等には見られない異常な特徴を持つことが明らかとなった. その特徴の 1 つとしては, CuO_2 面内から大量の酸素が欠損しているということであるが, このような酸素欠陥を含む具体的な構造については, 未だ実験的に同定されていない.

本研究では, このような酸素欠陥を含む結晶構造として Lieb 格子型の結晶構造を提案し, 第一原理計算からその構造安定性を示した [2]. そして, この結晶構造について多軌道ハバード模型を構築し, 揺らぎ交換近似を用いて超伝導の解析を行った. その結果, 異なる軌道間に働く相互作用が重要な役割を果たす 2 種の新規な超伝導機構の可能性を提案した.

その 1 つは, 軌道内と軌道間のペアが共存した超伝導機構であり, ここでは s 波と d 波のペア対称性が拮抗していることがわかった. また, もう一方のメカニズムである incipient なバンド (フェルミ面を構成する 2 つのバンドのうち片方のバンドがフェルミ準位からちょうど離れる寸前, あるいはちょうどかかる寸前の状態) における s 波超伝導増強が, 同じく incipient な状況で高温超伝導が実現するとされている単一軌道 bilayer 模型 [3] と関連していることを見出した. この関係から, 2 軌道模型における非自明な s 波超伝導増強の起源が, 軌道間相互作用と軌道内相互作用の協力にある可能性を示した.

[1] W. M. Li *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **116**, 12156 (2019).

[2] K. Yamazaki, M. Ochi, D. Ogura, K. Kuroki, H. Eisaki, S. Uchida, and H. Aoki, Phys. Rev. Res. **2**, 033356 (2020).

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

遷移金属ダイカルコゲナイドにおけるポリ励起子の 拡散モンテカルロ法による研究

宮前陽充 浅野研究室 (物理学専攻)

複数の励起子の束縛状態 (ポリ励起子) は, 通常の谷構造のない直接型半導体では励起子 2 個の場合 (励起子分子) しか観測されない. 電子や正孔の内部自由度がスピン由来の 2 なので, パウリ排他律が 3 個以上の励起子の束縛を抑制するのである. しかし, 近年注目されている遷移金属ダイカルコゲナイドの二次元結晶では, 2 個のみならず 3 個あるいは 4 個の励起子から成るポリ励起子が実現し得る. 実際, この物質は伝導帯と価電子帯が共に 2 つの谷を持つ直接型半導体で, 電子や正孔がスピンと谷を併せて内部自由度 4 を持つ. この系では, 低次元性によるポリ励起子の束縛の増強を期待できる上, 原子層を重ねることで電子と正孔を空間的に離れた別々の二次元面に閉じ込めることもできる. そこで本研究では, 内部自由度 4 の電子と正孔から成る二次元ポリ励起子をごく一般的に考察した.

具体的には, $N(=1,2,3,4)$ 個の電子と同数の正孔を互いに区別できる異種粒子として扱い, それらが互いに Coulomb 相互作用する系の厳密な基底状態のエネルギー E_N を, 拡散モンテカルロ法を用いて数値的に評価した. その結果, ポリ励起子からの発光エネルギーを表す $E_N - E_{N-1}$ が, 近似的に N に関する線形関係 $E_1 - U(N-1)$ に従うことを見出した. このとき $E_N \simeq NE_1 - UN(N-1)/2$ が成り立つから, 比例定数 $U (>0)$ は励起子間の有効引力相互作用という物理的な意味を持つ. 線形関係は電子正孔の質量比や, 電子面と正孔面間の距離によらず成立しており, 比例定数 U はこれら 2 つのパラメーターに依存して決まる. 実は, 伝導帯が谷構造を持つバルクのシリコンやダイヤモンドでは, ポリ励起子由来の発光ピークが等しいエネルギー間隔で並ぶ現象が観測されており, 得られた結果はこの現象が次元等によらない極めて普遍的なものであることを示すものである. さらに, 電子間および電子正孔間の対分布関数を計算して, それを基にポリ励起子の内部構造についても解析した.

重回帰分析によるレーザーイオン加速の最大エネルギー予測式の導出

高木悠司 高エネルギー密度科学理論グループ (物理学専攻)

近年の高強度レーザーの発展により、相対論的強度 ($>10^{18}$ W/cm²) のレーザーと物質との相互作用によってミクロンの加速長で MeV を超える高エネルギーイオンを発生させることができるようになった。コンパクトな高エネルギーイオン源として、がん治療などへの応用が期待されている。これまでに高強度レーザーによるイオン加速について理論モデルやシミュレーションによる研究が進められてきたが、加速エネルギーの定量的な予測ができる段階には到達していない。

そこで本研究では、粒子法によるレーザープラズマシミュレーションと統計的解析の一手法であるベイズ統計に基づく重回帰分析を用いて、水素イオンの最大加速エネルギーを定量的に記述できる予測式を導出した。

図は、実験で観測された水素イオンの最大加速エネルギー (横軸) に対して、予測式から求めたエネルギー (縦軸) をプロットしたものである。導出した予測式により、シミュレーションによる直接的な予測よりも実験結果を高精度に予測することに成功した。

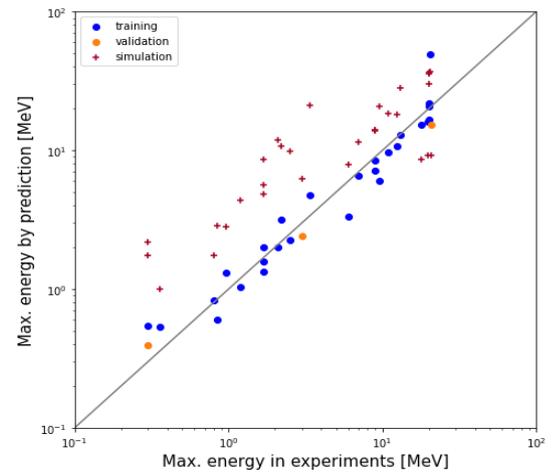


図 水素イオンの最大加速エネルギーの導出した予測式による予測値とシミュレーションによる予測値。●が予測式、+が1次元PICシミュレーションによる。

太陽風プラズマ中でのホイッスラー波同士の相互作用によるプラズマ加熱現象

巽悠輔 レーザー科学研究所・高エネルギー密度科学理論グループ (物理学専攻)

近年の人工衛星による太陽風観測により太陽風プラズマ中にホイッスラー波が存在すること、そのホイッスラー波の周波数分布などが明らかになってきた[1]。太陽風プラズマと実験室のレーザープラズマとは等価な物理パラメータを持つことが知られている。また、レーザープラズマにおいて、同じ周波数を持ち対向で伝播するホイッスラー波がプラズマ中で衝突するときイオンが効率的に加熱される現象が報告されている[2]。

そこで本研究では、太陽風プラズマのような環境下で、異なる周波数同士のホイッスラー波が相互作用することで、どのようなプラズマ加熱が実現できるのかを、次元 PIC シミュレーションを用いて詳しく調べた。また、2つの波の進む方向が同じ場合、波が1つのみの場合についても調べ比較を行った。その結果、イオンと電子が吸収するエネルギー量が、2つの波の周波数差に強く依存することがわかった。さらに、この相互作用で生成されるプラズマの特性と太陽風における観測量との関係についても議論する。

[1] Y. Tong, et al., *Astrophys. J. Lett.* 870, L6 (2019)

[2] T. Sano, et al., *Phys. Rev. E* 100, 053205 (2019)

アンドープ GaAs/AlGaAs 量子井戸構造を用いた 面内 P-(i)-N 接合の作製と評価

柳谷 諭 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量子通信への応用も期待できる。長距離量子通信のための量子中継器の基盤技術として、ゲート制御量子ドットを使用し、単一偏光光子から単一電子スピンへの変換が実証されている[1]。量子光源としては、自己形成量子ドットを使った単一光子源の研究は活発であるが、ゲート制御量子ドットを量子光源に応用する試みはほとんどない。その実現はゲート制御量子ドットの量子情報における有用性をさらに高める。ゲート制御量子ドットを発光素子に組み込むためには面内構造の発光素子が必要である。そこで、アンドープGaAs量子井戸中にゲートで誘起する面内P-(i)-N接合を採用した[3]。本研究では、アンドープGaAs量子井戸基板を(井戸幅 11nm)用いて面内P-(i)-N 接合を作製し、電気特性やエレクトロルミネッセンス(EL)スペクトルについて調べた(図1)。挿入図にP-(i)-N 接合の特徴である整流性を示す。EL スペクトルの2つのピークはHH とLH からの発光に対応し、その位置は計算値と一致していた。これらの結果は、面内P-(i)-N 接合からの発光が実現できたことを示唆している。

[1] T. Fujita et al. Nature communications **10**, 2991 (2019)

[3] Van-Truong Dai et al. Optics Express **22**, 3811 (2014)

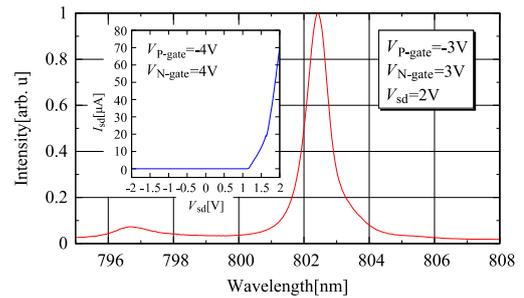


図 1. EL スペクトル($T=4K$)

宇宙地球科学専攻

会場：D403

2月9日（火）

一次元温度勾配場におけるかんらん石中の Soret 効果 土井惇司 近藤研究室 (宇宙地球科学専攻)

Soret 効果とは、多成分系において温度勾配によって引き起こされる物質拡散現象を指す。この効果は気体や液体中だけでなく、コロイドや固体中にも見られる。また、拡散種は単原子や低分子に限らず、イオンや錯体、高分子単位でも起こる。気体中の Soret 効果は、気体分子運動論から予測された式が、実験によって得られた Soret 係数の値とよく一致することが知られている (Chapman and Cowling, 1970)。一方で、液体や固体では原子分子間の複雑で強い相互作用が理論的な予測を難しくさせている。ある凝縮系において、温度勾配に対してどの成分がどの方向にどのくらい移動するかは、実際に測定してみなければほとんどわからない。

地球科学においては、ケイ酸塩メルトや溶融鉄合金といった液体中での Soret 効果の測定や理論的な予測が多くなされてきた (e.g. Leshner and Walker, 1986)。他方で固体、特に結晶中での Soret 効果の解明はほとんど進んでいない。上部マントルの代表鉱物であるかんらん石についてもその例外ではない。

そこで本研究では、抵抗加熱式ヒーターと水冷を組み合わせた装置を用いて、San Carlos 産かんらん石単結晶試料に定常な一次元温度勾配を与える実験を行った。回収した試料を SEM で観察すると、太さサブミクロンの線状に鉄が濃集しており、局所的な不均質が確認された。加えて EDS を用いた元素マッピングにより、1000°C から 800°C までの温度勾配を 345 時間与え続けた試料では、+200°C の温度差で鉄のモル濃度が平均+1.7%変化したことがわかった。この結果は単純な速度論や熱力学的議論からは説明できないもので、結晶中の複雑な相互作用によってもたらされたと推察される。

月面に露出した深成岩の観測のための、 岩石の構成鉱物境界面の分光学的性質の研究 松井俊樹 佐々木研究室 (宇宙地球科学専攻)

2022 年度打ち上げ予定の月探査機「SLIM」は神酒の海でマントル物質が露出していると考えられる地点にピンポイント着陸し、搭載されたマルチバンドカメラ (MBC) でカンラン石を含んだ岩石を可視近赤外線での場観測する。MBC での観測に向けてカンラン石を含む岩石の反射スペクトルが測定されはじめているが、カンラン石の特徴である 1000nm 付近の吸収を示すものと示さないものがある。本研究では、吸収ピークを示す岩石と示さない岩石の分光学的な違いを明らかにするために、鉱物境界面に着目してモデル計算や実際の岩石や鉱物の観測を行った。モデル計算として、2つのカンラン石結晶が結合した2層モデルの反射スペクトルから鉱物境界面の光の散乱面としての強さを評価した。光の散乱面として空隙と結晶方位の異なる鉱物境界面の2種類を想定し、結晶光学の関係式を用いてカンラン石の1層目と2層目それぞれの結晶方位や厚みを考慮して2層モデルの反射スペクトルを計算した。また、外形が明瞭なカンラン石の自形単結晶から結晶方位や厚さを制御して結晶切片を得た。切り出された結晶2枚を重ね合わせて焼結前後それぞれの状態で近赤外分光観測を行った。さらに天然岩石について近赤外分光観測と SEM による内部構造の観察、鉱物同定を行った。その結果、結晶方位の異なる鉱物境界面は光の散乱面としては弱いということがわかった。そして、吸収ピークを示さない岩石では、岩石内部で光吸収が飽和することで表面反射光のみが検出されたのに対して、吸収ピークを示す岩石では、表面反射光に加えて岩石内部で散乱された有意な吸収を受けた光が観測されていることが推測された。

木星衛星 Callisto の内部進化：不完全な分化と地下海の維持 松岡夏季 佐々木研究室（宇宙地球科学専攻）

太陽系の木星以遠に存在する、表面を氷に覆われた「氷天体」の幾つかにおいては、その氷殻下に海の存在が示唆されており、生命体の存在可能性が議論されている。木星衛星 Callisto もそのひとつであり、1979年のボイジャー探査機による地形観測、および1996年のガリレオ探査機による磁場観測から、内部には電気伝導層として振る舞うような地下海が、全球的に存在していると考えられている。一方で、重力場観測によって得られた0.3549という慣性能率の制約下では、Callisto 内部は岩石成分と水の分化が不完全であると示唆される。これらの観測に基づき、先行研究では地下海の有無を含めた現在の Callisto の内部構造について実験的・理論的な推測はされているが、その長期的な進化に関する定量的で詳細な考察は未だ行われていない。特に、現在の Callisto が地下海を保持しつつも成分分化が不完全であるという内部状態を実現するような進化の描像は提示されていない。本研究ではその実現に向けて、内部岩石核が含水状態にあると仮定した新たな進化モデルを構築し、現状を再現し得る進化過程を探索した。初期 Callisto は現在の質量と半径を持ち、内部は含水岩石核、地下海、氷殻の3層構造にあると仮定して、高圧氷層の出現および岩石核の脱水反応を含めた50億年間の内部熱進化のモデル計算を行った。熱源には岩石中の長寿命放射性核種の壊変熱を考え、現在の内部構造と慣性能率の観測的制約とを照合して正しい進化を見出す。岩石組成をCIコンドライトと仮定したとき、不完全な分化を維持したまま H_2O 層の相変化のみが起こった。一方、普通コンドライトを仮定したとき、岩石の脱水縮小を経験しつつ、観測された慣性能率と調和的な不完全な分化を維持し得ることが分かった。地下海維持には、典型的な氷の融点粘性率 $10^{13} \sim 10^{15}$ Pas の場合、潮汐加熱などの追加熱源または融点降下物質(NH_3)が必要となるが、 10^{17} Pas 以上の場合は、壊変熱のみで厚い地下海が現在まで維持されることが分かった。

月極域模擬凍土の近赤外スペクトル形状に 共存する鉱物の粒径と種類が与える影響の研究 荒木 亮太郎 佐々木研究室（宇宙地球科学専攻）

90年代以降、月面に水が存在する証拠が様々なリモートセンシング分析によって指摘されるようになってきた。月面において、水は極域の永久影領域に水氷の状態で分布すると考えられているが、その存在形態や濃度に関する詳細はいまだ不明である。宇宙航空研究開発機構とインド宇宙機関は共同で、南極に探査機を着陸させ永久影領域の水氷をローバから観測する月極域探査：LUPEXを2023年度以降に行うことを計画している。この探査計画では、近赤外分光手法を用いてローバから水氷をその場観測することが決定されている。LUPEX計画を見据え、近赤外分光手法により月面土壤に微量混合した水氷を定量検出する手法の、精度向上研究の一環として、月面土壤を想定した鉱物粉体の粒径や種類を変え、着氷スペクトル挙動がどのように変化するか調べることが本研究の目的である。月面土壤を模擬した鉱物粉体を落下式の装置を用いて着氷させ、波長850 nm ~ 1600 nmの範囲で近赤外分光観測を行った。着氷試料のスペクトルには波長1500 nm付近に水氷による吸収が存在する。鉱物種はかんらん石および斜長石の粉体を対象に、粒径をそれぞれ2通りに変化させて実験した。その結果、いずれの鉱物種においても粒径が細かいほど水氷の吸収の影響が小さくなることが確認された。また、粒径の細かい鉱物の反射スペクトルについて、従来のベースライン除去手法では1 wt%未満の水氷の定量が困難であった。そこで着氷スペクトルの反射率を乾燥鉱物粉体のスペクトル反射率で割ることで得た、光学的厚みを補正した差スペクトルを利用した。これによって水氷の吸収量を計量する手法を開発し、先行研究の手法よりも少量の水氷を検出可能なことを示した。

微動の潮汐応答変化に基づく断層特性の制約

坂本 龍之輔 田中研究室 (地球惑星科学専攻)

プレート境界の剪断滑りによって発生する深部微動 (以下、微動) の応答は潮汐応力に応じて鋭敏に変化する。微動の潮汐応答は有効法線応力や摩擦特性などの断層特性を反映していると考えられる。そのため、理論的なモデルを用いて潮汐応答が断層のどの物理パラメータにどう依存するか評価できれば、観測された潮汐応答から断層特性を制約することが可能となる。しかし、従来の断層特性を組み込んだモデルはスロースリップイベント (SSE) 時の潮汐応答を部分的にしか説明できておらず、断層特性を十分に制約しているとは言い難い。

本研究では、先行研究で用いられてきた微動震源を取り囲む 1~2 桁大きいスケールの非地震性滑り域の滑りが微動を引き起こすと仮定した 1 自由度バネブロックモデルに、新たにダイラタンシーを導入した。ダイラタンシーを導入することで、観測された SSE 時の潮汐応答が定量的に再現できるようになることが示された。さらに、観測結果とモデルとの比較により、遷移領域の非地震性滑り域の断層特性が次のように制約できた: 臨界滑り距離が $10^{-2}\sim 1$ m、拡散係数が少なくとも 10^{-8} m^2/s より小さい、静岩圧に近い間隙水圧、有効法線応力と摩擦パラメータ a の積が 1~2 kPa、室内実験と同程度のダイラタンシー係数をもつ。本モデルによる断層特性の制約は、適切な断層特性を用いたシミュレーションに基づくスロー地震発生の素過程の解明に繋がると期待できる。

炭質物熱熟成反応への繰り返し地震による

累積加熱の影響の実験的検証

島村優太郎 桂木研究室 (宇宙地球科学専攻)

地震下にて解放されるエネルギーの大部分が断層での摩擦発熱であるため、この摩擦熱を推定することが地震のメカニズムの理解へとつながる。炭質物は加熱に伴い弱く複雑な化学結合が分解され、官能基の脱離が起こり、グラファイト構造へと変化していく。この反応は不可逆的であるため、先行研究では赤外分光法・ラマン分光法や質量分析法、ビトリナイト反射率測定、元素組成分析といった様々な手法が用いられてきた。しかし、これらは繰り返す地震による累積加熱の影響を考慮していない。よって、本研究では炭質物の熱熟成反応における累積加熱の影響を評価するため、室内での加熱実験および分光分析を実施した。試料は瀝青炭と無煙炭の 2 種類で、それぞれをガラス管に真空封入後、管状加熱炉において 100, 300, 500, 600, 700, 900, 1100, 1300 °C での 40 秒間加熱を、累積加熱の模擬するために 1, 10, 100 回行った。また、化学反応速度論の検討のため瀝青炭のみ 500 °C において 8 時間と 16 時間を、600 °C において 8 時間の長時間加熱を実施した。その後、実験前後の試料両方で赤外分光分析・ラマン分光分析を行った。結果として、700 °C 以下での加熱では各試料において違いが確認されなかった。しかしながら、900 °C 以上では複数の温度において加熱回数が多いほど熱熟成が進んでいることが確認された。よって、地震時の短いタイムスケールにおける摩擦発熱においても、繰り返し熱が与えられた場合には熱熟成が進行してしまうと結論づけられる。これにより、先行研究における炭質物を用いた断層摩擦熱推定では過大に評価されている可能性があるといえる。

断層摩擦発熱指標としての炭質物の熱熟成反応 における速度論的影響の実験的評価 山下修平 桂木研究室 (宇宙地球科学専攻)

地震時に解放されるエネルギーの大部分は摩擦発熱であるため、断層に記録されている過去の地震の摩擦発熱の情報を抽出することは極めて重要である。この温度情報の検出にあたり、断層に含まれる炭質物の熱熟成反応は不可逆的であり、摩擦発熱の最高履歴温度を記録しているため、近年の断層研究で広く用いられている。但し、炭質物は複雑な分子構造を持ち、初期熟成度による分子構造の違いや地震時の剪断によるメカノケミカル効果を受けるが、先行研究ではこのような影響や熱熟成時の昇温速度の影響はほとんど精査されていない。

そこで、本研究では初期熟成度の異なる3種類の炭質物(褐炭・瀝青炭・無煙炭)とグラフアイトを用いて、地震を模擬した摩擦実験を実施した。昇温速度は約200 °C/秒と約0.5 °C/秒の2つの条件を設定した。そして、摩擦実験によって機械的なダメージを与えた試料とそうでない試料の2系統を準備した。以上の条件のもと、実験前後の試料において、赤外分光分析とラマン分光分析による有機分子構造の変化を調べた。結果、遅い昇温速度で褐炭の赤外分光分析にて、剪断後試料のほうがより低い温度で官能基が脱離することが確認された。また、褐炭、瀝青炭、無煙炭において、速い昇温速度より遅い昇温速度のほうがより低い温度で反応が起きることが確認できた。

以上より、炭質物の熱熟成反応を断層の摩擦発熱指標として適応する際には、炭質物の初期熟成度と昇温速度およびメカノケミカル効果を十分に考慮する必要があると言える。

光受容タンパク質における情報伝達機構の解析

中島 碩士 ソフトマター地球惑星科学グループ (宇宙地球科学専攻)

地球上の生命にとって、光はエネルギー源あるいは情報を伝える媒体として、非常に重要である。そのため生命は、光を受容するためのタンパク質分子を発達させてきた。細菌類や植物などには、代表的な光受容タンパク質の一つである Light-Oxygen-Voltage (LOV) 型光受容タンパク質 (LOV タンパク質) が存在している。LOV タンパク質は、一般的に、光情報受容領域である「LOV ドメイン」と、生物学的な細胞応答を引き起こす領域である「効果ドメイン」から構成されている。効果ドメインの活性は LOV ドメインにより制御されているが、そのメカニズムに関してはまだ明らかにされていない。本研究では、モデルタンパク質である光ジッパータンパク質 (PZ) を用いてその解明を目指した。先行研究から、LOV コア領域と A'α ヘリックス間のヒンジ領域あるいは LOV コアにある β シート上の疎水領域が、光情報伝達経路として推定されていることから、これらの部分に加えて A'α ヘリックスのアミノ酸を他のアミノ酸に置き換えた変異タンパク質を用い、分光学的測定、光による二量体形成、DNA 結合活性の変化などの測定を行なった。驚くことに、ヒンジ領域の変異体は全ての実験で変異の影響がほとんど認められなかったが、β シート疎水領域および A'α ヘリックスの変異体では大きな変化が観察された。以上の結果から、LOV ドメインにおける光情報の伝達は、LOV コアにある β シート疎水面の変形を介して A'α にヘリックスに伝えられることが明らかになった。

惑星質量比の重力マイクロレンズイベント OGLE-2014-BLG-0221(0284)/MOA-2014-BLG-069 の解析 桐川凜太郎 赤外線天文学グループ (宇宙地球科学専攻)

1995年に初めて太陽系外惑星が発見されてから数十年経った今、系外惑星の発見数は4000個を超えている。私が所属する Microlensing Observations in Astrophysics (MOA)グループは、ニュージーランドに設置した口径 1.8m の広視野望遠鏡を用いて、重力マイクロレンズ法による系外惑星探査を行なっている。系外惑星探査法の一つである重力マイクロレンズ法は、二つの天体が視線上で重なる時に背景星の像が分離または増光する重力レンズ効果から前景天体を発見する手法である。発見される惑星はガス惑星から岩石惑星まで大小様々で、共通して惑星形成が活発だと考えられている水のスノーライン付近に位置するという特徴を持つ。重力マイクロレンズ法により発見が報告された惑星はまだ 100 例ほどにとどまり、今後の統計的議論のためにもサンプルの増加が望まれている。

本研究では 2014 年に発見された重力マイクロレンズイベント OGLE-2014-BLG-0221 (0284)/MOA-2014-BLG-069 の詳細解析を行った。光度曲線のモデルフィッティングを行った結果、発見天体が木星質量程度の重さの惑星を有する惑星系であることを示唆する 2 つの候補モデルが発見された。2 つのモデルのうち、片方のモデルから推定される発見天体の明るさは、光度曲線から予想される明るさを大きく超過してしまうことがわかったため、もう一方のモデルを本研究の最終結論とした。このモデルに対して銀河系モデルを事前確率としたベイズ推定を行い、発見天体が M 型星と巨大ガス惑星から成る惑星系であると結論づけた。イベントからおおよそ 7 年が経過した現在、惑星系とその背景星は相対固有運動により 35mas 離れていると予想され、地上の大型望遠鏡や宇宙望遠鏡の高分解能撮像装置を用いた追観測のターゲットに適していると考えられる。

畳み込みニューラルネットワークを用いた 重力マイクロレンズイベント即時検出システムの効率化 小路ひかる 赤外線天文学グループ (宇宙地球科学専攻)

我々 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。現地では観測したデータをリアルタイムで差分画像解析 (Difference Image Analysis; DIA) し、新しい増光イベントが検出されるとそのイベントを中心に切り取った DIA 画像と光度曲線が作られる。それらを観測員が目視で確認することにより、重力マイクロレンズ現象による増光イベント (マイクロレンズイベント) を発見している。しかし、リアルタイム解析によって検出される増光イベントの 95% 以上は偽陽性であり、現状の目視確認作業は非常に非効率な上に、マイクロレンズイベントの発見が観測員の技量やバイアスに影響を受けてしまう可能性がある。そこで本研究では、深層学習の一種である畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network; CNN) を用いて光度曲線からマイクロレンズイベントかそうでないかを分類するモデルの作成を行なった。2016 年 1 月から 2020 年 3 月までに観測された 3960 イベントを学習させ、2020 年 7 月から 10 月までにリアルタイム解析で増光イベントとして検出された 140777 イベントに対してモデルを用いて判断を行ったところ、マイクロレンズイベントの検出率が 98.1%、偽陽性率は 4.4% となった。また、DIA 画像から星か星でないかを分類するモデル (末松修論 2019) と組み合わせて運用することにより、マイクロレンズイベントの検出率が 98.7% に増加し、目視確認作業に表示されるイベントの 95.2% を削減することに成功した。このモデルを現地の観測システムに実装し、イベントの目視確認作業が効率化されただけでなく、マイクロレンズイベント発見のプロセスにある一律の基準を設けて再現性を担保できるようになった。

重力マイクロレンズ法によるブラックホール探査

田中謙 赤外線天文学グループ(宇宙地球科学専攻)

ブラックホールは自ら電磁波を発することがないため、直接法で捉えるためには、ブラックホールの周囲に形成される降着円盤が発する電磁波を観測する。しかし、単独で存在する恒星ブラックホールの場合は降着円盤を形成しないため、直接観測で発見することができない。一方で、重力マイクロレンズ法は対象天体からの光を直接利用しないという特徴から、褐色矮星や浮遊惑星など、非常に暗い天体であっても発見が可能である。本研究ではこの特徴に着目し、単独で存在する恒星質量ブラックホールをターゲットに、重力マイクロレンズ法によるブラックホール候補天体の探査を行った。まず、2005～2014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に対して解析を行い、ブラックホール候補となるタイムスケールが長いイベントを探した。その結果、2つのブラックホール候補イベント gb9-2-4-380、gb5-8-5-271600 を選出した。さらに、これら2個のイベントに対して銀河モデルを仮定したベイズ推定を行い、レンズ天体の物理量を見積もった。本研究は、MOA グループにおいて、系統的にブラックホール候補天体を探した初の例である。

ブラックホールは発見の難しさから現在も存在量が良く知られておらず、ダークマター候補の1つとなっている。重力マイクロレンズ法であれば電磁波を発しないブラックホールを発見することができるため、今後、ブラックホールをはじめとしたダークマター候補の存在量への制限に有効であると考えられる。

デフォーカスイメージフィッティングを用いた 近赤外線重力マイクロレンズサーベイ望遠鏡 PRIME の光学調整

山脇翼 赤外線天文学グループ(宇宙地球科学専攻)

我々 Prime-focus Infrared Microlensing Experiment (PRIME) グループは、近赤外線の世界最大級視野の PRIME1.8m 望遠鏡を用いて、重力マイクロレンズ法を用いた系外惑星探査を行う。PRIME 望遠鏡は、南アフリカ天文台のサザーランド観測所に建設予定で 2021 年度から観測を開始する。広視野望遠鏡の光学調整を行う場合は、全視野に渡って高い光学性能を満たさなければならず、一般的に小さな検出器を用いてこれを行うことは困難である。

本研究では、PRIME 望遠鏡の光学調整用テストカメラを製作し、テストカメラの視野端のデフォーカス像の形状から光学系の収差を解析的に導くアルゴリズムを開発した。この手法では、PRIME 望遠鏡の光学系における光学収差をシミュレートし独立な収差パターンをモデル化しておく事で、テストカメラの観測画像から光学系の位置関係のずれを瞬時に推定することができる。また、大きな検出器を必要とせず二つのテストカメラの小さな検出器の観測画像のみから、PRIME 望遠鏡の広視野全体での光学調整を可能にする。

2020 年 10 月に日本にある PRIME 望遠鏡を製作した工場では、本手法を用いた光学調整試験を 2 夜に渡り実施した。天頂付近の星の像を解析し反復的な調整を行った結果、目標とする光学性能に近づけることができた判断した。

この成果は、現地組み立て時の調整を簡略化するだけでなく、観測中に望遠鏡の姿勢に対する収差補正を行う能動光学システムとして導入できる可能性を示している。

氷天体の表面応力と地下海進化：冥王星衛星 Charon の断層形成

山田幸子 佐々木研究室（宇宙地球科学専攻）

多くの氷天体の表面には拡張性断層が見られ、天体の体積変化の痕跡とされる。その要因には主に、内部の温度変化や液体水（地下海）の相変化による体積変化が考えられるが、これらは内部熱進化と直接に関係するためその定量的な考察が行われていない。そこで本研究では、氷天体の内部熱進化をモデル計算で見出すとともに、それに伴う体積変化や応力発生を定量的に評価する。まず地下海の相変化（固化）に伴う体積増加と応力発生の上限值を見出すために、岩石核を覆う表層海が全て凍結した際の表面の弾性応力を計算する。様々な天体半径と核サイズ比をパラメータとした結果、弾性応力は天体半径にほぼ依存せず核サイズ比のみに依ることが分かった。ただし実際の海の固化融解は内部熱史に従い、かつ表面氷は粘弾性的振る舞いをするため、内部熱進化と粘弾性応力をカップリングさせた計算モデルを新たに構築し、冥王星衛星 Charon に対する計算を行った。Charon は南半球に巨大な断層域を持つものの、推定年代は 20~40 億年前と不定性が非常に大きく地質史がよく分かっていない。本研究では、初期の Charon の海は全て固化した状態を仮定し、岩石核中の放射性熱源を考慮した熱進化計算を行ったところ、約 40 億年前に地下海が誕生し 10~15 億年前に再び全て固化するという進化が見出された。また、このときの相変化（地下海の厚さ変化）に伴う体積変化は、衛星全体の温度変化に伴うそれよりも有意に大きいことも分かった。地下海が成長する過程では表面に圧縮応力が生じるが、長期間にその応力が緩和しつつ海が再び固化する過程で引張応力に転じる応力史も見出された。この描像は本研究の粘弾性計算によって初めて見出されたものであり、氷殻の粘性率がの場合は 20 億~30 億年前に引張応力が最大となり、氷の引張強度を大きく上回ることが分かった。

月面を模擬した混合物組成による宇宙風化実験

島名亮太 佐々木研究室（宇宙地球科学専攻）

宇宙風化作用とは、大気のない岩石質天体が長期間宇宙空間にさらされることで光学的性質が変化する作用である。宇宙風化による反射スペクトルの変化（赤化、暗化、吸収帯の弱化）は、微小隕石の衝突や太陽風の照射などにより天体表面にナノメートルサイズの鉄微粒子を生成することによると知られている（Hapke,2001）。カンラン石などの鉄を多く含む鉱物に対しての宇宙風化模擬実験は多く行われてきたが、斜長石などの鉄をあまり含まない鉱物に対しては、ほとんど行われていない。また、紫外光による宇宙風化模擬実験もほとんど行われていない。天体表面の鉱物組成や、その天体の宇宙風化の主な原因などの要素によってスペクトル変化の程度が異なるため、研究対象の天体に応じた模擬実験をすることが重要である。本研究では、パルスレーザーと紫外光ランプを用い、それぞれ、微小隕石の衝突と太陽光線からの紫外光の照射を模擬した宇宙風化模擬実験を行った。本実験では、月面の主な鉱物組成である斜長石、カンラン石を試料とした。実験の結果、斜長石単体のレーザー照射では大きな変化は見られなかったが、カンラン石を 20wt%混合させることでスペクトル変化が促進されることがわかった。また、紫外光照射によってもスペクトル変化を起こすことができることがわかった。斜長石への紫外光照射によって数年程度の非常に短いタイムスケールで大きな変化を起こし、最大 50%ほどの暗化が起き、長期間大気中にさらしてもスペクトルの変化が戻らないことが初めて分かった。これらの実験から、紫外光照射による宇宙風化は、微小隕石の衝突による宇宙風化と異なる原因であると考えられる。また、斜長石を多く含む月面の高地は、レゴリス形成時から短いタイムスケールで紫外光による紫外から近赤外領域の暗化を受けた後、数億年というタイムスケールで、微小隕石の衝突による暗化、赤化を受けていることが示唆され、現在の月面の反射率の低さを説明できる可能性がある。

海王星衛星 Triton の窒素噴出現象における内部熱構造の寄与 今井田 奈波 佐々木研究室 (宇宙地球科学専攻)

天体の噴出現象は、内部の活動や組成を知るための重要な窓となる。海王星衛星 Triton は、太陽系で最初に噴出現象が発見された氷天体で、1989 年に Voyager2 号が初めて接近観測した際に、その表面は極めて若い年代を持ち、さらに表面から高度 8km に達する窒素ガスの噴煙柱の観測から現在も活発な天体であることが明らかになった。これまでこの噴出現象は太陽日射による地表面の窒素氷の昇華であると考えられ、日心距離、表面の組成が近い冥王星でもこの現象が観測されると予測された。しかしながら、2015 年に New Horizons 探査機によって観測された冥王星の地表面にはそのような噴出が見られなかったことから、この現象について新たな説明が必要だと考えられる。そこで本研究では、窒素噴出現象の発生条件を再検討することを目的として、Triton の内部温度構造に注目し熱進化計算を行った。モデル計算では、熱源として岩石核内で発生する放射性元素の崩壊熱と軌道傾斜角によって内部海の底面で発生する潮汐加熱を考え、固体氷殻および岩石核内での対流と伝導による熱輸送と H_2O の固液相変化、氷殻に数 wt% 存在するとされる NH_3 による H_2O の融点降下を考慮した。氷の融点粘性率や潮汐加熱率、 NH_3 の濃度をパラメータとした 46 億年間の長期シミュレーションを行い Triton の内部温度構造を調べた。その結果、現在も表面内部熱流が太陽日射と同程度以上のエネルギーを保持することがわかり、窒素噴出現象には内部熱流による駆動が可能であることが示唆された。また、氷の融点粘性率が 10^{14}Pa s 以上であれば、内部海が現在まで保持されるという結果より海に溶け込んでいた窒素が離溶して急激に上昇し噴出する可能性も検討した。熱進化計算より得た温度圧力条件から窒素の化学平衡状態を計算し窒素の相状態を推定したところ、内部海から地表面までに窒素が液相から気相状態に相変化することがわかり、内部海から窒素ガスが噴出する可能性が見出された。

リチウムジャーマネートガラスにおける圧力誘起局所構造変化 超高压力下マグマの物性の解明に向けて 谷口翔一 惑星物質学研究室 (宇宙地球科学専攻)

初期の地球はマグマオーシャンと呼ばれるマンツルの部分が溶融した状態にあったと考えられている。数値計算による先行研究では、マグマオーシャンからの冷却過程ではマンツルの対流が大きく関わっているとされている。マンツルの主要構成物質であるシリケートは加圧により、配位数変化を伴う高压相転移を起こすことが知られている。液体や非晶質においてもこのような圧力誘起局所構造変化が起こることが知られている。そのため、シリケート融体の圧力誘起局所構造変化について調べることは地球の分化過程の研究に対し重要である。シリケートは高い融点を持ち、局所構造変化を起こす圧力領域も高い。そのため、融点がシリケートより低く、シリケートと同様の局所構造変化を起こす圧力領域の低いジャーマネートがアナログ物質としてよく高压実験に用いられている。

本研究では超高压力下マグマの物性を解明することを最終目標とした。我々の研究グループではマグマの局所構造変化について調べるために常温のアルカリジャーマネートガラスを用いて高压力下その場 XAFS 測定を行ってきた。そこで、マグマの局所構造変化に関してさらに理解を深めるため、複数の温度条件においてリチウムジャーマネートガラスを用いた高压下その場観察実験を行った。加えて、分化過程における下部マンツル領域での分別結晶化をリチウムジャーマネートにより模擬し、液体中の結晶の分布について調べた。これらの実験結果と比較するため、分子動力学シミュレーションも実施した。

これらの実験の結果、温度条件によって 5 配位構造がある程度広い圧力領域にわたって維持される可能性があることが明らかになった。また、液体中の結晶の分布について調べた結果から、5 配位構造が固体と液体の密度変化の様子を異なるものにしていく可能性が示唆された。

宇宙地球科学専攻

会場：D403

2月10日（水）

高分解能計算に基づいた超新星フィードバックモデルの構築

奥 裕理 長峯研究室 (宇宙地球科学専攻)

超新星爆発が周囲のガスを吹き飛ばす働きは超新星フィードバックと呼ばれ、銀河内の星形成を抑制する働きを持つ、銀河形成において重要な物理機構である。kpc~Mpc スケールの物理を扱う銀河形成シミュレーションでは pc スケールの超新星爆発を空間分解できないため、超新星フィードバックモデルが必要である。先行研究では、銀河の星質量を再現することを目標とした現象論的なモデル化が行われていた。2023 年から稼働する Subaru PFS での分光観測により銀河周辺のガスの速度、密度、金属量が得られると、超新星フィードバックが引き起こすガスダイナミクスを観測的に議論できるようになる。観測結果を理論に基づいて解釈するためには、pc スケールの物理に基づいたフィードバックモデルが必要である。

星形成領域で時間的空間的に集中して超新星爆発が起こると、スーパーバブルと呼ばれる構造が形成される。本研究では格子法の流体計算コード Athena++ (Stone et al. 2020) を用いた 3 次元流体シミュレーションによってスーパーバブルが持つ運動量の環境依存性を調べ、その結果を超新星フィードバックモデルへ応用した。本研究では先行研究で考慮されていなかった金属量依存性を調べ、スーパーバブルの時間発展が統一的なモデルによって表されることを明らかにした。次に、高分解能計算で得た結果を SPH 法の宇宙論的流体計算コード GADGET3-Osaka (Shimizu et al. 2019) の超新星フィードバックモデルとして実装した。モデル化の際は、バブルが周囲のガスをかき集めて運動量を獲得する過程を考慮し、モデルに物理的意味を与えた。また、超新星フィードバック前後で全運動量が保存するモデル化を行った。これら 2 点は先行研究では正しく考慮されていなかった点である。テスト計算として孤立銀河のシミュレーションを行い、超新星フィードバックが星形成を抑制することを確認した。一方で、銀河風が再現されず、モデルに改善の余地が残されていることが分かった。

原始銀河団領域での星形成と化学組成比進化

福島啓太 宇宙進化グループ (宇宙地球科学専攻)

銀河団の前駆体と考えられている原始銀河団 (Protocluster; 以後 PC) が高赤方偏移 ($z \geq 2$) にて見つかっている。PC 候補天体の数は、すばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam を用いた撮像観測などにより、近年急激に増加している。PC 領域は、高赤方偏移の宇宙において特に高密度な領域である。高密度領域ほど活発な星形成が起こると考えられており、PC は宇宙の星形成密度に大きな寄与を与えると示唆されている。活発な星形成により生まれた星々は、超新星爆発や Asymptotic Giant Branch (AGB) 星による金属放出によって金属汚染を引き起こす。そのため PC 領域では周囲に比べ金属量が高く、化学組成比の進化も早く進むと考えられる。今後、すばる超広視野分光器サーベイによって、数多くの PC の星形成率や PC 中ガスの金属量・化学組成比分布などの物理量が得られるようになる。これに向けて PC の星形成率や金属量、化学組成比の進化を理論的に予測しておくことは非常に重要である。そこで我々は、宇宙論的流体シミュレーションコード GADGET3-Osaka (Shimizu et al., 2019) により、zoom-in 手法を用いて PC 形成の計算を行い、星形成率と金属量、化学組成比の分布と進化を明らかにしようと試みた。GADGET3-Osaka は熱エネルギーだけでなく力学的フィードバックを考慮した超新星爆発モデルを取り入れており、化学進化ライブラリ CELib (Saitoh, 2017) を用いて、II 型、Ia 型超新星爆発と AGB 星による金属生成を流体計算と同時に解くことができる。その結果、PC 領域の全星形成率は $z=3$ で観測値に近い $3000 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ に達しており、その中でも中心のコア領域では $z=2$ で PC 全体の星形成の約半分を行っていることが分かった。化学組成比進化を調べることにより、 $z \geq 2$ では II 型超新星爆発の影響が見られ、 $z=3$ では Ia 型超新星爆発と AGB 星の効果が現れることを明らかにした。

MMX 搭載用イオンエネルギー質量分析器 MSA の開発 出口雅樹 寺田研究室 (宇宙地球科学専攻)

2024 年に打ち上げが予定の火星衛星探査計画 MMX(Mars Moons eXploration)では、サンプルリターンを含めた科学観測を行い、火星衛星の起源及び表層環境・周辺環境を明らかにすることを大きな目的としている。搭載されるイオンエネルギー質量分析器 MSA(mars moon MassSpectrum Analyzer)は探査機に飛来したイオンを観測する装置で、フォボス由来のイオンを重要な観測対象とする。また、MSA は火星大気を起源とするイオン(C, N, O, Ar)の観測も同時に行う。これらの同位体を分離して観測するためには高い質量分解能 $M/\Delta M \sim 100$ という性能が要求されるが、これまでの同型装置の質量分解能は $M/\Delta M \sim 50$ である。そこで本研究は $M/\Delta M \sim 100$ を実現する質量分析部の開発を行うことを目的としている。

質量分析部では飛行時間 TOF(Time Of Flight)を計測することで、飛来イオンの質量電荷比の分析を行う。質量分析部入口に設置した数 10\AA の薄膜カーボンフォイルを通過する際に、イオンのエネルギー減損、角度散乱、電荷交換が起こる。また、内部には質量分解能を向上させるために、線形に増加する電場 LEF(Linear Electric Field)が配位されている。本研究では数値モデルの精度を高めるために、イオンのエネルギー減損と角度散乱について TRIM(Transportation of Ion in Material)で計算した。LEF を形成する -12kV が印加されたメッシュの曲率半径を 40.0cm としたとき、数値モデルの質量分解能は $M/\Delta M \sim 300$ であり、数値的に要求性能を満たすことを確認した。続いて、数値モデルを基にして BBM を作成し、JAXA 宇宙科学研究所の真空チェンバ内で 2keV の He, N, O イオンビームを入射させた結果、数値モデルと BBM の TOF スペクトルの波形が一致することが分かった。また、BBM の質量分解能は $M/\Delta M \sim 150$ であり、数値的に要求性能を十分に満たすことから、火星大気起源イオンを同位体で分離して観測できると考えている。

高強度レーザー駆動無衝突衝撃波によるイオン加速 中川義治 中井研究室 (宇宙地球科学専攻)

地球に降り注ぐ高エネルギー荷電粒子「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、ハイパワーレーザー・プラズマ相互作用で無衝突衝撃波を発生させることが実現し、実験室内で宇宙線加速の素過程を探索することが出来るようになった。特に無衝突静電衝撃波加速 (CSA) では、衝撃波面の静電ポテンシャルのピークが、上流イオンを反射し加速させる。衝撃波速度 V_{sh} が上流イオンの速度 V_0 よりも十分大きければ、反射イオンの速度は $2V_{sh} (>> V_0)$ となり、準単色なエネルギースペクトルを持つ [1]。この加速法を用いることにより、最終的には準単色 100MeV 級プロトンビームの高繰り返しを実証し、医療やその他の応用を目指す。

本研究では、関西光科学研究所の J-KAREN-P レーザー ($800\text{nm}, <5 \times 10^{21}\text{W/cm}^2$) を $\text{C}_8\text{H}_7\text{Cl}$ 薄膜ターゲットに照射し、CSA の実験を行った。ドライブレーザーの一部を 1 インチミラーで取り出し、イオン化レーザーとしてターゲットの裏面側に照射し、臨界密度程度のプラズマを生成しておき、約 2.5ns の遅延時間をもってドライブレーザーを照射した。ターゲットの厚み ($1 - 2\ \mu\text{m}$)、イオン化レーザーの有無、レーザーエネルギー ($0.6 - 12\text{J}$)、スポット径 (直径 $\sim 2, \sim 6\ \mu\text{m}$)、パルス幅 ($40 - 400\text{fs}$) 等を変えて実験を行なった。イオン計測にはオンライン型トムソンパラボラスペクトロメータを使用した。イオン化レーザー有りの場合で準単色のイオン加速が起き、無しの時に低エネルギー粒子のみを観測する結果が得られた。その際のパラメータは、流体シミュレーションで CSA に適した電子密度になる時のパラメータと概ね一致した。また、粒子シミュレーションとの比較も行った。

[1] R. Kumar, Y. Sakawa, et al., Phys. Rev. ACCEL. BEAMS 22, 043401 (2019).

多重コード化マスクの導入による MIXIM の有効面積拡大

石倉彩美 松本研究室(宇宙地球科学専攻)

X線天文衛星の標準形は、斜入射反射鏡と X線 CCD を組み合わせたものになっている。その中で、他を大きく凌駕する高い角度分解能 0.5 秒角を実現しているのが、1999 年に打ち上げられ現在も活躍中の Chandra 衛星である。この角度分解能を超える反射鏡の開発は続けられているが、目途はたっていない。そこで我々は、格子とピクセル検出器からなる、新たな原理の X線撮像システム、多重像 X線干渉計 (MIXIM; Multi Image X-ray Interferometer Method) を発案した (Hayashida+2016)。MIXIM はマルチスリットカメラであるが、Talbot 干渉条件を満たすイベントのみを選択し、回折を抑えるところにポイントがある。SPRING-8 BL20B2 において X線照射実験を行い、昨年度には X線天文用広帯域撮像系として世界最高の 0.1 秒角を切る分解能の二次元撮像に成功した。ただし、この際用いた格子は、開口率 0.2 の一次元格子を 2 枚直交させており、有効面積が幾何学面積の 4 %以下になるという問題があった。有効面積を向上させるために、我々が再び発案したのが、単純なスリットあるいはピンホールの代わりに、コード化マスクパターンを周期的に並べる多重コード化マスクである。

開口率が約 50 %の多重コード化マスクを計 4 種類 (12.5 μm 周期の 5x5 パターンが 3 種類、27.5 μm 周期の 11x11 パターンが 1 種類) LIGA プロセスにより製作し、これらを用いた実験を SPRING-8 BL20B2 において 2020 年 2 月と 7 月に実施した。これらの実験で、多重コード化マスクに対しても Talbot 干渉が起こることをはじめて実証した。これにより有効面積は、直交格子の場合に比べて 15-26 倍と、大幅に向上した。得られた干渉像を最適周期で重ね合わせた像に対しては、さらにデコードという像再合成が必要になる。一般的な (単一) コード化マスクに対するデコードのアルゴリズムを参考に MIXIM の多重コード化マスクに適した方法を開発、再合成に成功した。再合成によって 2 点源の分離も確認できた。

MIXIM 用 CMOS 素子のデータ処理システム開発と 荷電粒子バックグラウンド・放射線劣化の研究

佐久間 翔太郎 松本研究室 (宇宙地球科学専攻)

我々は、従来の X線撮像系とは全く異なる原理を用いた、多重像 X線干渉計 (Multi-Image X-ray Interferometer Module ; MIXIM) の開発を進めている。2019 年の SPRING-8 実験では、天文用広帯域 X線撮像としては最高の、角度分解能 0.1 秒角を切る二次元撮像に成功している。MIXIM の X線検出器には高い位置分解能が必要で、実際、2.5 μm の微小ピクセル CMOS センサ GMAX0505 の採用が、この結果に直結した。

しかし、この GMAX0505 を衛星搭載するためにはいくつかの課題がある。ひとつは、衛星搭載用 CMOS 駆動・データ処理システムの開発である。本研究では、シマフジ電機他と共同で、同社の ZDAQ-SoC ボードをベースに、GMAX0505 用駆動・データ処理システムを開発した。実際に GMAX0505 で X線撮像・分光できることを示し、フレームデータの取得・保存レートも 1.3 s に 1 枚と、従来使用していた素子メーカー提供評価ボードの 3 倍を達成した。また、取得したフレームデータからダークレベルを決め、X線検出するアルゴリズムを新たに開発した。衛星搭載 X線 CCD のそれをベースにしているが、本研究で発見した CMOS 特有の異常ピクセルの振る舞いに対処する工夫を施している。もうひとつ、GMAX0505 を軌道上で使用するにあたって問題になるのが高エネルギー荷電粒子の影響である。X線データに対する雑音となる荷電粒子に対する応答を ^{207}Bi からの電子線照射実験で調べた。GMAX0505 の空乏層が薄いことで、MIXIM の対象 5 keV 以上のバンドへの寄与は非常に小さいという結果を得た。また、若狭湾エネルギー研究センターにおいて 200 MeV 陽子線照射実験を行い、放射線劣化の影響を検証した。1 kRad、軌道上 3~6 年分の照射後の GMAX0505 を、5.9 keV X線照射で評価すると、スペクトルにピークがみえないほど劣化する。しかし、全体の 1%のピクセルを取り除くと分解能 175 eV を確保できることがわかった。

時間変動を用いた Radio-loud AGN の X 線スペクトル成分分解 服部 兼吾 松本研究室 (宇宙地球科学専攻)

活動銀河核 (AGN) ジェットの生成メカニズムは宇宙物理学における長年の問題であるが、巨大ブラックホール (SMBH) への質量降着と密接に関連することが見えてきている (e.g., Marscher et al. 2002, Inoue et al. 2017)。広輝線電波銀河 (BLRG) および γ -loud 狭輝線セイファート 1 型銀河 (γ -NLS1) からの X 線スペクトルには SMBH 近傍の降着流およびジェット成分が混在すると考えられており (Abdo et al. 2009, Kataoka et al. 2011)、それらを切り分けた上で強度の関係を調べれば、SMBH 近傍の質量降着とジェットの関係に制限を与えることができる。しかし、どの成分も似た形のべき関数型スペクトルになることが知られており、X 線スペクトルのモデルフィットでは同一のデータで複数の解釈が縮退していた (e.g, Kataoka et al. 2007, Cowperthwaite & Reynolds 2012)。そこで我々は、電波から γ 線までの多波長の観測が盛んに行われている BLRG と γ -NLSy1 の代表天体である 3C120 と 1H0323+342 に着目し、X 線強度の時間変動を利用してスペクトルの成分分解を試みた。広帯域の X 線を同時にカバーできる X 線天文衛星 XMM-Newton、NuSTAR および「すざく」によって得られた X 線アーカイブデータに対して、異なる X 線帯域の時間変動の相関を利用する手法 (Noda et al. 2011, 2013) を系統的に適用した。その結果、3C120 では、 ~ 1 日のタイムスケールで激しく変動するべき ~ 2.1 の成分と、そのタイムスケールでは変動が乏しいべき ~ 1.7 の成分の分解に成功した。また、1H0323+342 では、べき ~ 1 と ~ 2.6 で構成される成分と明るさに応じてカットオフエネルギーが変化する成分に分解できた。これらは降着流からの逆コンプトン成分、ジェットからのシンクロトロンおよび逆コンプトン散乱成分のいずれかを捉えたものと考えられる。本講演ではこれらの結果を紹介し、各成分の起源について、他波長の観測とも比較しながら議論する。

XRISM 衛星 Xtend のフライト用 CCD 較正実験と応答関数構築 花岡 真帆 松本研究室 (宇宙地球科学専攻)

2022 年度打ち上げ予定の X 線分光撮像衛星 (XRISM) には、軟 X 線分光装置 (Resolve) と軟 X 線撮像装置 (Xtend) が搭載される。Xtend は、軟 X 線望遠鏡 (XMA) と大阪大学が主たる開発機関である X 線 CCD カメラ (SXI) で構成され、38 分角の広い視野、0.4 keV から 13 keV のエネルギー帯域で撮像分光を行う。2019 年には、阪大実験室内に構築した CCD 実験装置を使って、CCD 選択と較正実験を行った。構築した実験装置は、真空中で -110°C に冷却した状態の CCD に、X 線発生装置からの連続 X 線をターゲット (LiF, SiO₂, Al の切り替え式) に照射して出た蛍光 X 線、および密封線源 ⁵⁵Fe、²⁴¹Am からの X 線を照射できる。CCD 選択は、メーカーから納入された要求性能を満たす 12 素子の CCD から、衛星搭載用の 4 素子を選ぶ実験である。較正実験は、選んだ 4 素子の CCD に関して、2 素子ずつ、それぞれ約 1 週間をかけて較正を行う。較正実験で、0.5 keV から 18 keV の範囲の蛍光 X 線に対する検出器応答を測定するとともに、光子の入射位置に依存する電荷転送効率の補正をはじめとする様々な補正パラメータを決定した。これらの補正を施したデータから作成した X 線スペクトルに関して、応答関数を構築するのが本研究の目標である。特に、単色の X 線を検出した際に得られるスペクトルの形状、ラインプロファイルに関して詳しく調べた。その際に問題になったのが、目的とした元素の蛍光 X 線以外の輝線及び連続成分の寄与である。これを定量化するため、較正実験装置の CCD の位置にシリコンドリフト検出器を設置し、入射 X 線スペクトルを詳細に調べた。さらに、較正実験装置と最終的な搭載カメラ形態でのシステム読み出しノイズの違いも考慮した。結果的に、ひとみ衛星搭載 SXI の応答関数の関数形を踏襲し、微調整をすることで、XRISM/Xtend-SXI の応答関数を構築することができた。この応答関数は打ち上げ後、世界中の研究者によって使用される。

あらせ衛星の観測に基づく、磁気圏 N^+ の観測研究

津田洗一郎 寺田研究室(宇宙地球科学専攻)

地球の磁気圏のプラズマの供給源は、太陽風起源と地球の電離圏起源の2種類に分けられる。 O^+ や N^+ 、分子イオン(N_2^+ 、 NO^+ 、 O_2^+)は電離圏のみを起源にするため、これらを磁気圏で観測すること

で、大気流出の情報を得られる可能性がある。特に O^+ と N^+ は質量電荷比が近いので、加速加熱過程はほとんど同じであると考えられ、磁気圏での N^+/O^+ 比は電離圏での N^+/O^+ 比に対応するため、流出してくる場所の情報を得ることができる。過去の観測では、 N^+/O^+ 比の太陽活動依存性(Liu et al,2005)と磁気活動度依存性(Christon et al,2002)から太陽活動度や磁気活動度が大きくなると、電離圏の下部や、低緯度からの大気流出が起きていることが分かっている。しかし、 N^+ と O^+ の質量電荷比が非常に近く、両者を分別するのが難しいという理由で、 N^+ の観測報告は少なく、大気流出の過程や経路、メカニズムについてはまだ分かっていない。

よって、本研究の目的は、 N^+ や O^+ 、分子イオンなどの電離圏起源の重イオンを磁気圏で観測し、地球の電離圏からの大気流出の過程に制約をつけることである。

あらせ衛星に搭載されている MEP-i は、静電分析部と TOF(Time-of-flight)計測部、固体検出部からなる質量分析計で、質量電荷比ごとのカウント数を測ることができる。本研究では、MEP-i の測定で得られた TOF スペクトルに対して、ガウシアンを用いてフィッティングを行うことによって N^+ と O^+ の分離を試みた。また、分子イオンのカウント数も求めた。この手法で、2017年の磁気嵐のデータ解析を行った結果、平穏時は N^+/O^+ 比とL値に右上がりの傾向が見え、磁気嵐時にはL値が4-6で N^+/O^+ 比が小さくなっていった。この結果から、磁気平穏時に磁力線に沿って大気が流出し、磁気嵐時にはプラズマシートからリングカレントに注入されていると考えられ、流出経路に関して制約を与えることができた。

宇宙線によるミュオン特性 X 線元素分析装置の開発

室田雄太 寺田研究室(宇宙地球科学専攻)

宇宙を構成する素粒子である負ミュオンは電荷が-1で、電子の約200倍の質量をもつ。そのため、物質中で重い電子の様に振る舞うという特徴がある。負ミュオンが物質中に停止すると、原子核のクーロン場に捕獲され、原子核を周回する。この状態をミュオン原子と呼ぶ。ミュオン原子におけるミュオンの周回軌道半径は電子の約1/200となるため、軌道遷移により放出される特性 X 線は、電子特性 X 線に比べて約200倍高いエネルギーを持つ。近年、このミュオン特性 X 線を使用した非破壊元素分析の実用化に著しい進展があり、ミュオンビームを利用できる加速器施設において、隕石等のミュオン特性元素分析が積極的に行われている。

この分析法は、試料を一切傷つけることなく、その内部の化学組成を定量出来るため、地球惑星科学や考古学など希少試料を扱う分野で注目を集めている。しかし、分析の実施は大型加速器施設で行う必要があるため、博物館などから持ち出しが出来ない試料は分析することができないという弱点がある。

本研究は、地表面に降り注いでいる宇宙線ミュオンに着目し、この弱点を克服するオンサイトミュオン元素分析装置の開発を目指すものである。まず、宇宙線ミュオンの低エネルギー成分を利用した分析装置について、シミュレーション計算により実証機の仕様を決定した。製作した実証機を用いて、銅、鉄、アルミニウム、炭素の標準試料に対して測定を行い、ゲルマニウム半導体検出器で得られたエネルギースペクトルから標準試料が測定されていることを確認した。また、シミュレーションで得られた結果との整合性について考察を行い、本分析方法の性能と展望について検討した。

3次元積層三角格子ハイゼンベルク反強磁性体における スカーミオン格子相

長村 療 波多野研究室 (宇宙地球科学専攻)

磁性体中で実現する渦励起の一種である磁気スカーミオンは、そのトポロジカルな性質から電子デバイス等への応用が期待されている。この磁気スカーミオンは、バルク物質中ではスカーミオン格子と呼ばれる周期構造を形成していることが知られており、近年その発現機構や安定化条件が議論されている。例えば、2次元三角格子上の J_1 - J_3 ハイゼンベルク反強磁性体では、2つの相互作用 J_1 , J_3 の競合による磁氣的フラストレーションが存在する状況下で、熱揺らぎの効果によりスカーミオン格子が磁場中で実現することが理論的に明らかにされている。

一方で、現実の磁性体は通常、準2次元系又は3次元系であり、2次元面内だけでなく面間方向にも相互作用が存在する。このような3次元系では、2次元系と比較して系の熱揺らぎが抑制されることから、2次元系と同様にスカーミオン格子が実現するかどうかは自明でない。そこで本研究では、2次元の三角格子を直上方向に積層した積層三角格子上でのハイゼンベルクモデルを考え、磁場中での磁気秩序をモンテカルロシミュレーションを用いて調べた。その結果、面間の相互作用 J_{1c} が強磁的な場合には、スカーミオン格子面がそのまま直上に積層した3次元秩序を形成することがわかった。一方、 J_{1c} が反強磁性的な場合には、スカーミオン格子面がスライドしながら積層する奇妙な3次元パターンが現れることが明らかとなった。

球殻の膨張破壊における破片サイズとスケーリング則

藤倉 雅人 波多野研究室 (宇宙地球科学専攻)

マスクメロンの網目模様は、成長時の内圧で生じたひび割れによるものと言われている。このように過度な負荷が加わることで生じるひび割れや断片化現象はこれまでに様々な系や破壊方法で研究されてきた。断片化現象は、衝撃や爆発のような一瞬のイベントで引き起こる「瞬間的断片化」と内部応力の蓄積により引き起こる乾燥破壊や柱状節理といった「準静的断片化」に分けられ、マスクメロンのひび割れは後者に分類される。過去の研究で乾燥破壊や柱状節理において、系が2次元平面や3次元立方体での研究はされてきたがマスクメロンのような3次元球形で比較的ゆっくりとした破壊についての研究はあまりない。そこで、本研究では球殻の膨張破壊の統計的性質を調べるためにシミュレーションを行った。

モデルとして時間に比例して増加する圧力で膨張し、歪みがある破壊閾値を超えるとバネが壊れるといった破壊条件を課した3次元DEMを構築した。パラメータとして緩和係数、破壊閾値、圧力増加率を変えてシミュレーションを行った結果、破片サイズ分布は、ベキ分布+指数関数的減衰もしくは、対数正規分布となった。この破片サイズ分布は時々刻々と変化するが、特に前者の分布はその時刻の平均破片サイズでスケーリングすることができ、時間に依らない分布形となることがわかった。またこのとき、あるスケーリング則が成立することもわかった。これらの結果から、ひび割れ・断片化の法則における球殻の膨張破壊の普遍性・個別性がわかった一方、当初の目的であった準静的な破壊の観点から課題も明らかになったのでこれについても議論したい。

速度状態依存摩擦法則による周期運動の実現可能性

水嶋遼 波多野研究室 (宇宙地球科学専攻)

地震は断層が急激に滑ることによって起きる現象である。断層の滑り挙動は、主に断層面に働く摩擦力により支配されているため、岩石の摩擦法則について知ることは特に重要である。この岩石摩擦は、滑り速度と、滑り面の状態を示す「状態変数」から決まる、「速度状態依存摩擦法則」により良く記述される事が知られている。しかし、ここでの「滑り面の状態」は曖昧な概念であるため、状態変数の発展法則には様々な経験的法則が用いられてきた。

本研究では、発展法則に関する曖昧な状況を解消するため、発展法則と断層の滑り挙動との関係を調べることで、どのような法則が望ましいか考えた。具体的には、一定速度で動く連続体中にパッチ状の滑り領域を考え、様々な発展法則を適用したうえで、その滑り挙動を調べた。このモデルでは、滑り領域の大きさがある臨界値を超えると、Hopf分岐が起きることで滑りが不安定になり、地震につながる急激な不安定滑りが起きることが知られている。さらに、実際の断層運動を考えると、不安定滑りは固着と滑りを繰り返す状態であるから、不安定化後には周期運動に対応するリミットサイクルが現れる事が望ましい。

しかし、本研究で非線形解析の手法である Dulac の定理を用いた解析を行ったところ、Aging law や Slip law といったしばしば用いられる発展法則を用いた場合、リミットサイクルは現れず、解が発散するという事が明らかになった。この結果は、断層運動を再現できないということであり、既存の発展法則に何らかの欠陥があるということを示唆する。

そこで、本研究ではさらに新たな発展法則を構成し、Hopf分岐の標準形理論を用いて、どのようなパラメータ領域でリミットサイクルが生じるのか特定した。また、定常状態での摩擦係数の速度依存性について、実際の実験結果と比較することで法則の妥当性を議論した。

判定会議について

判定会議

日時：2月10日（水）16:00～

会場：D303

※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。

2020年度 修士論文発表会 予稿集

発行：2021年2月3日

編集：修士論文発表会世話人

物理学専攻 越野研究室

河本京也

玉置弦

宇宙地球科学専攻 長峯研究室

大西一慶

寺口遼