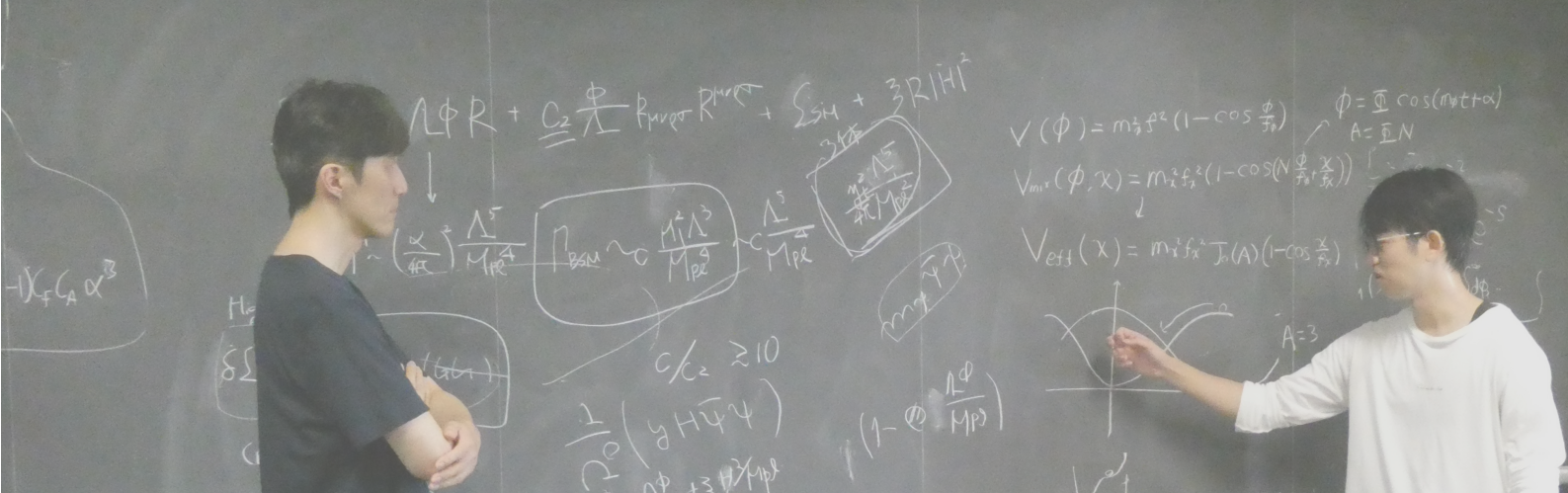


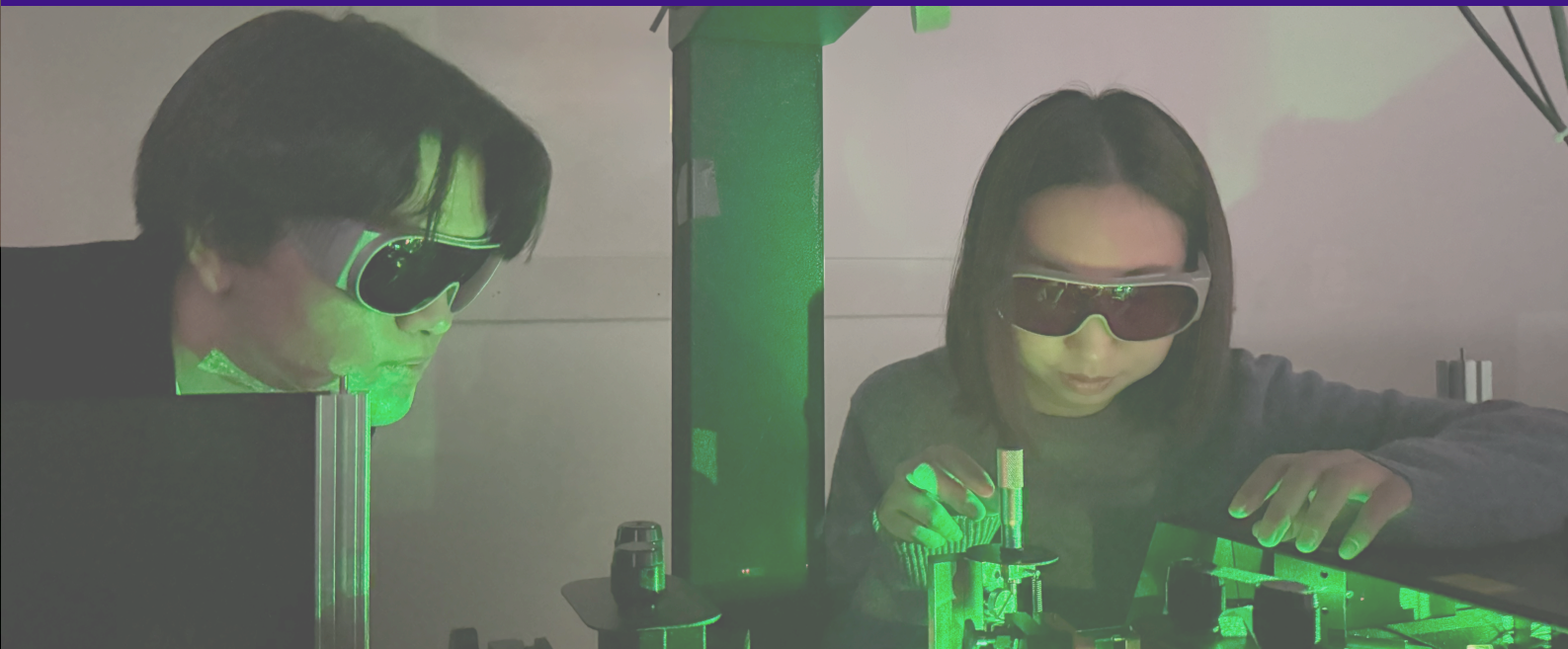


TOHOKU  
UNIVERSITY



東北大学大学院理学研究科

物理学専攻案内 2026



## まえがき

### – 東北大学物理学専攻を知るために –

このパンフレットは、物理学を本格的に学びたいと望む人たちに、東北大学大学院理学研究科物理学専攻の教育と研究の概要を紹介するものです。

本専攻は全国でも最大規模であり、素粒子・原子核物理学から物性物理学・生物物理学まで、現代物理学の広範な分野にわたって高度な研究活動を展開しています。本専攻の誇る充実した研究設備は層の厚い教員と大学院生に活用され、その高度な研究を支えています。例えば、Nature の特別企画冊子である Nature Index による研究機関ランキングの Physical Sciences (物理科学) の分野で、本専攻は高い評価 (Nature Index tables: Institutions-Physical Sciences-Academic: 2024 国内3位) を得ています。2024 年より東北大学が国際卓越研究大学に認定され、物理学専攻の研究もさらに充実することが見込まれています。

次世代の物理学を担う研究者の育成も私達の使命です。大学院の教育には物理学専攻に所属する教員ばかりでなく、東北大学の研究施設や研究所に所属する多数の教員が積極的に関与し大学院生を受け入れています。博士後期課程へ進学する院生の半数程度は、修士2年次から分野横断型の学位プログラムに参加し、各プログラム独自の教育を受けるとともに経済的支援を得ています。他の経済支援プログラムを含めると、現在、95%の博士後期課程の院生が経済的な支援を受けて研究に専念しています。

このパンフレットで紹介している各研究グループの研究活動等については、下記の Web ページから、さらに詳しく調べることができます。

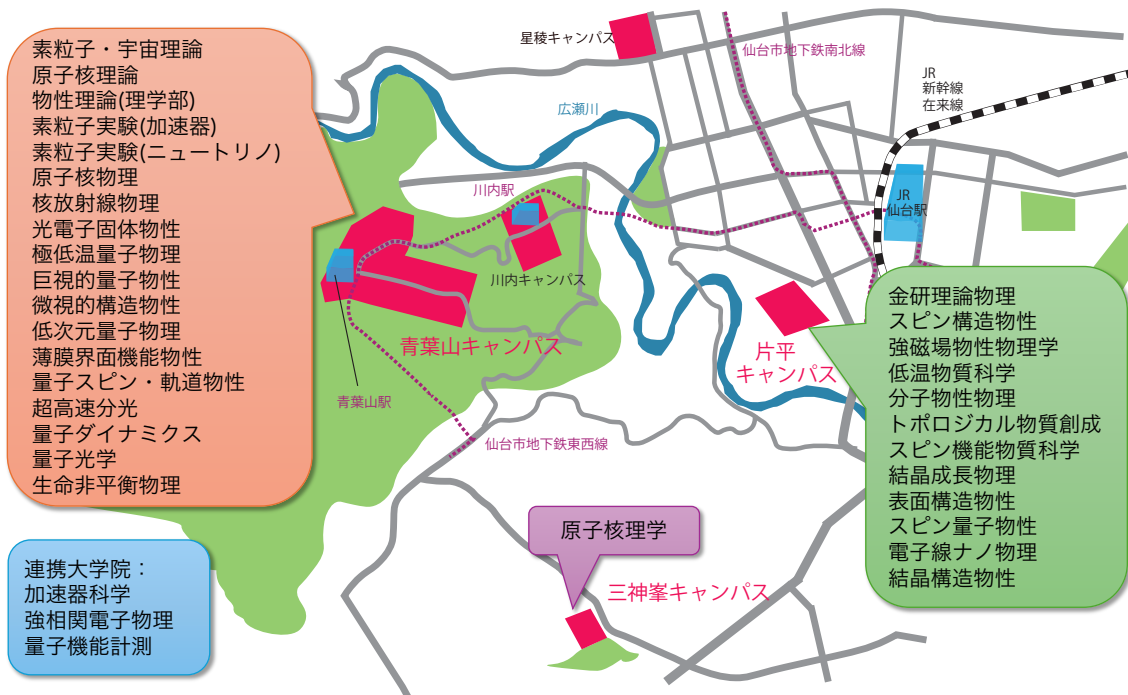
古くから学都として知られる仙台の地は、研究・教育環境はもちろん、若い皆さんが生活する都市の環境としても国内有数の好条件を備えています。次世代の物理学を担い未踏の分野を開拓することをめざす皆さんが、本専攻の教育を通じてさらに成長し個性を開花させて活躍することを、私達は期待しています。

物理学専攻の Web ページ： <https://www.phys.tohoku.ac.jp/>

# 東北大学物理学専攻について

## 専攻の概要

物理学専攻は5つの基幹講座（素粒子・原子核理論、素粒子・核物理学、電子物理学、量子物性物理学、物性理論）と2つの専担講座（領域横断物理学、相関物理学）で構成され、これらの講座と共に研究・教育を推進する協力講座が、理学研究科附属研究施設、附置研究所、全学教育施設等の協力のもと設置されています。協力講座として、素粒子・原子核分野では原子核理学講座（原子核理学研究施設、2009年より電子光物理学研究センター、2024年より先端量子ビーム科学研究センターに改組）、高エネルギー物理学講座（ニュートリノ科学研究センター）、および核放射線物理学講座（サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター、2024年より先端量子ビーム科学研究センターに改組）が、また物性物理学分野では結晶物理学講座（金属材料研究所）、金属物理学講座（金属材料研究所）、分光物理学講座（多元物質科学研究所）が物理学専攻に加わりました。さらに連携大学院が新設され、東北大学以外の研究機関の研究者が本専攻の研究・教育に協力するようになりました。2007年には原子分子材料科学高等研究機構が発足し、その教員も物理学専攻の教育・研究に参加するようになりました。現在、本物理学専攻は、基幹・協力講座、連携大学院合わせて約150名の教員により構成されており、国内外でも最大級の物理学教育研究組織になっています。



## 専攻への入学

本専攻の入学定員は、博士課程前期2年の課程（修士）が91名、博士課程後期3年の課程（博士）が46名です。博士課程前期2年の課程の選考試験は、一般選抜と自己推薦入試の2種類があります。一般選抜は8月下旬に行われます。入試に関する詳細は下記 Web ページにて案内しております。

<https://www.phys.tohoku.ac.jp/graduate-school/>

願書提出方法の詳細については、理学研究科より配布予定の募集要項をご覧ください。

東北大学大学院理学研究科教務課大学院教務係

〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3

電話：022-795-6351

E-mail: sci-in@grp.tohoku.ac.jp

にお問い合わせください。

博士課程後期3年の課程（博士）への進学は、修士論文の発表と最終試験の結果から総合的に判断され、許可されます。また、他大学で修士課程を修了した学生が博士課程後期3年の課程への編入を希望する場合には、学内からの進学に準じた選考試験を受ける必要があります。この場合、あらかじめ物理学専攻長、または希望する研究分野の教員にお問い合わせください。

## 就職状況

本専攻では、博士課程前期2年の課程（修士）の修了生の半数以上が就職し、そのほかの修了生は博士課程後期3年の課程に進学します。

就職先に関しては、修了生が物理学の知識と論理的思考力を身につけていることが高く評価され、産業界の基幹をなす大企業の研究所から大学、国公立研究機関、官公庁、教員など多方面に及んでいます。特に、企業への就職は、電気・電子・情報系・鉄鋼・金属・素材系、重機械・精密機械系、化学工業関連といった理系職種は言うまでもありませんが、近年では文系職種であっても論理的思考力、数学的センスが重視され、商社、銀行、生保、報道関係など多岐にわたっています。

博士課程後期3年課程（博士）の修了生の多くは、国内外の大学、国公立研究機関あるいは大企業の研究所などで、高度な研究を進展させて活躍しています。

# 物理学専攻研究グループ一覧

注1) 2028年3月末までに定年となる教員(\*印)は、2027年度博士課程(前期)入学者の指導教員にはなれません。また2027年度入学者の指導にあたらぬ研究グループ名にも\*印を付しています。

注2) 教員名は、職位毎に姓の五十音順です。

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教員名	職位	掲載頁
素・核理論 Particle and Nuclear Theory	量子基礎物理学講座 Theoretical Nuclear and Particle Physics  <sup>1</sup> 学際科学 フロンティア研究所 Frontier Research Institute for Interdisciplinary Science	素粒子・宇宙理論 Particle Theory and Cosmology Group	すみの ゆきなり 隅野 行成 たかはし ふみのぶ 高橋 史宜 やまぐち まさひろ 山口 昌弘 いしかわ ひろし 石川 洋 なかやま かずのり 中山 和則 やまだ まさき 山田 將樹 よねくら かずや 米倉 和也 きたじま なおや 北嶋 直弥 ほった まさひろ 堀田 昌寛 やまだ よういち 山田 洋一	教授 教授 教授 准教授 准教授 准教授 准教授 准教授 <sup>1</sup> 助教 助教	12
		原子核理論 Nuclear Theory Group	ひやま えみこ 肥山 詠美子 ささき しょういち 佐々木 勝一 わたなべ かずひろ 渡邊 和宏 おの あきら 小野 章 かみや ゆうき 神谷 有輝	教授 准教授 准教授 助教 助教	14

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教員名	職位	掲載頁
物性理論 Condensed Matter Theory	固体統計物理学講座 Theoretical Condensed Matter and Statistical Physics	物性理論 (理学部)  Theoretical Condensed Matter and Statistical Physics Group	これつね たかし 是常 隆 教授 しばた なおかず 柴田 尚和 教授 うちだ なりや 内田 就也 准教授 さとう しゅんすけ 佐藤 駿 丞 准教授 な す じょうじ 那須 譲治 准教授 いずみだ わたる 泉田 渉 助教 お の あつし 小野 淳 助教 なかじま たつや 中島 龍也 助教 むらしま たかひろ 村島 隆浩 助教 もりた かつひろ 森田 克洋 助教		16
	金属物理学講座 Metal Physics  協力講座: 金属材料研究所 Institute for Materials Research	金研理論物理 IMR Theoretical Physics Group	のむら ゆうすけ 野村 悠祐 教授 むらかみ ゆうた 村上 雄太 准教授 ちえん しゃおい 陳 曉 邑 助教 もり ひとし 森 仁志 助教		18

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教員名	職位	掲載頁
素・核実験 Experimental Nuclear and Particle Physics	素粒子・核物理学講座 Experimental Nuclear and Particle Physics  高エネルギー物理学講座 High Energy Physics  協力講座: <sup>1</sup> ニュートリノ科学研究センター Research Center for Neutrino Science  <sup>2</sup> 高エネルギー加速器研究機構素粒子・原子核研究所 Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK	素粒子実験(加速器) Experimental Particle Physics Group (Accelerators)	いちかわ あつこ 市川 温子 なかむら きせき 中村 輝石 ルカス ベルンス Lukas Berns あしだ ようすけ 芦田 洋輔	教授 准教授 助教 助教	19
		素粒子実験(ニュートリノ) Experimental Particle Physics Group (Neutrino)	いのうえ くにお 井上 邦雄 きしもと やすひろ 岸本 康宏 しみず いたる 清水 格 いけだ はるお 池田 晴雄 いけだ もとやす 池田 一得 いしどしろ こうじ 石徹白 晃治 いちむら こういち 市村 晃一 こが まさゆき 古賀 真之 わたなべ ひろこ 渡辺 寛子 たけうち あつと 竹内 敦人 べ ハン ウク Bae Hanwook ほそかわ けいし 細川 佳志	教授 教授 教授 <sup>1</sup> 准教授 <sup>1</sup> 准教授 <sup>1</sup> 准教授 准教授 <sup>1</sup> 准教授 助教 助教 助教 <sup>1</sup>	21
		原子核物理 Experimental Nuclear Physics Group	みわ こうじ 三輪 浩司 たむら ひろかず 田村 裕和 いちかわ ゆうだい 市川 裕大 いわさ なおひと 岩佐 直仁 かねた まさし 金田 雅司 みき けんじろう 三木 謙二郎 うかい みふゆ 鵜養 美冬  こやま しゅんぺい 小山 俊平 ななむら たくや 七村 拓野 はやかわ しゅうへい 早川 修平	教授 特任教授(研究)* 准教授 准教授 准教授 准教授 准教授 准教授 准教授 助教 助教 助教	23

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教員名	職位	掲載頁
素・核実験 Experimental Nuclear and Particle Physics	原子核理学講座 Nuclear Science 協力講座: 先端量子ビーム科学研究センター (三神峯) Research Center for Accelerator and Radioisotope Science	原子核理学 Nuclear Science Group	おおにし ひろあき 大西 宏明 教授 かしわぎ しげる 柏木 茂 教授 きくなが ひでとし 菊永 英寿 准教授 ひので ふじ お 日出 富士雄 准教授 ときやす あつし 時安 敦史 助教 まつむら ゆうじ 松村 裕二 助教 みやべ まなぶ 宮部 学 助教 よこきた たくや 横北 卓也 助教		25
	核放射線物理学 講座 Nuclear Radiation Physics 協力講座: 先端量子ビーム科学研究センター (青葉山) Research Center for Accelerator and Radioisotope Science	核放射線物理 Nuclear Radiation Physics Group	いとう まさとし 伊藤 正俊 教授 てらかわ あつき 寺川 貴樹 教授 あだち さとし 足立 智 助教 いわもと 岩本 ちひろ 助教		27
	加速器科学講座 Accelerator Science <sup>1</sup> 連携大学院: 日本原子力開発機構 Japan Atomic Energy Agency	加速器科学 Accelerator Science Group	きんしょう みちかず 金正 倫計 教授 <sup>1</sup> (客員)		28

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教員名	職位	掲載頁
物性実験 I Condensed Matter Experiment I	電子物理学講座 Condensed Matter Physics – Electronic Properties –	光電子固体物性 Photoemission Solid-State Physics Group	さとう たかふみ 佐藤 宇史	教授 <sup>1</sup>	29
			すがわら かつあき 菅原 克明	准教授	
	1材料科学高等研究所 Advanced Institute for Materials Research  2高度教養教育・学生支援機構 Institute for Excellence in Higher Education	極低温量子物理 Low Temperature Quantum Physics	きむら のりあき 木村 憲彰	教授	30
			みづかみ ゆうた 水上 雄太	准教授	
		巨視的量子物性 Macroscopic Quantum Phenomena Group	おおぐし けんや 大串 研也	教授	31
			いまい よしのり 今井 良宗	准教授 <sup>2</sup>	
		微視的構造物性 Microscopic Structural Condensed Matter Physics Group	わかばやし ゆうすけ 若林 裕助	教授	32
	さいとう まきな 齋藤 真器名	准教授			
低次元量子物理* Low-Dimensional Quantum Physics Group	まつい ひろし 松井 広志	准教授*	33		
薄膜界面機能物性 Functional Properties of Thin Film Interface Group	なかむら まさお 中村 優男	教授	34		
	たかしろ たくや 高城 拓也	助教			
量子スピン・軌道物性 Quantum Spin-Orbit Condensed Matter Group	おおたに よしちか 大谷 義近	教授	35		
	しゅ みんらん 許 明然	助教			

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教員名	職位	掲載頁
物性実験 I Condensed Matter Experiment I	金属物理学講座 Metal Physics 協力講座: 金属材料研究所 Institute for Materials Research	スピン構造物性 Condensed Spin Matter Group	ふじた まさき 藤田 全基 いけだ よういち 池田 陽一 たにぐち たかのり 谷口 貴紀	教授 准教授 助教	36
		強磁場物性物理学* High Magnetic Field Condensed Matter Physics Group	のじり ひろゆき 野尻 浩之 チャンヒョンイ Chanhyeon Lee デビットグラシア アルカルデ David Gracia Alcalde	教授* 助教 助教	37
		低温物質科学 Low Temperature Materials Science Group	のじま つとむ 野島 勉 なかむら しんたろう 中村 慎太郎	准教授 助教	38
		分子物性物理 Condensed Matter Physics in Molecular Materials Group	さ さ き たかひこ 佐々木 孝彦 すぎうら しおり 杉浦 菜理 ふるかわ てつや 古川 哲也	教授 助教 助教	39
		トポロジカル物質創成 Topological Materials Exploration Group	さかい ひであき 酒井 英明 かわまた まさひろ 川又 雅広	教授 助教	40
		強相関電子物理学講座 Strongly Correlated Electron Physics 1連携大学院: 物質・材料研究機構 National Institute for Materials Science 2連携大学院: 量子科学技術研究開発機構 National Institutes for Quantum Science and Technology 3連携大学院: 日本原子力研究開発機構 Japan Atomic Energy Agency	強相関電子物理 Strongly Correlated Electron Physics Group	やまうら かずなり 山浦 一成 いしい けんじ 石井 賢司 とくなが よう 徳永 陽	教授 <sup>1</sup> (客員) 教授 <sup>2</sup> (委嘱) 教授 <sup>3</sup> (客員)

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教員名	職位	掲載頁
物性実験 II Condensed Matter Experiment II Experiment II	量子物性物理学講座 Quantum Condensed Matter Physics	生命非平衡物理 Physics of Living and Nonequilibrium Systems Group	とやべ しやういち 鳥谷部 祥一	教授	42
			さくま ゆか 佐久間 由香	准教授	
	領域横断物理学講座 Physics of Living and Nonequilibrium Systems Group <sup>1</sup> 高度教養教育・学生支援機構 Institute for Excellence in Higher Education	超高速分光 Ultrafast Spectroscopy Group	なかやま ようへい 中山 洋平	助教	43
			にしざわ けんじ 西澤 賢治	特任助教	
		量子ダイナミクス Quantum Dynamics Group	ゆき ごう 遊佐 剛	教授	44
			はしもと かつし 橋本 克之	助教	
		量子光学 Quantum Optics Group	ニコラス ムーア Nicholas Moore	助教	45
			かねだ ふみひろ 金田 文寛	教授	
	結晶物理学講座 Crystal Physics 協力講座: 金属材料研究所 Institute for Materials Research	スピン機能 物質科学 Spin-Related Functional Materials Science Group	とみた さとし 富田 知志	准教授 <sup>1</sup>	46
			おおの せいご 大野 誠吾	助教	
		結晶成長物理 Crystal Growth Physics Group	ソヨンベク Soyoung Baek	助教	47
			ボンフエイワン Pengfei Wang	助教	
			おの せよしのり 小野瀬 佳文	教授	46
			ますだ ひでとし 増田 英俊	講師	
			チョン チェン Chong Chen	助教	47
			ふじわら こうぞう 藤原 航三	教授	
			のざわ じゅん 野澤 純	准教授	47
			そう りちゅう 荘 履中	助教	
			すみよし いっしん 住吉 壱心	助教	

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教員名	職位	掲載頁
物性実験 II Experiment II	分光物理学講座 Solid State Spectroscopy  協力講座: 多元物質科学研究所 Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials	表面構造物性 Surface Structure Physics Group	あぶかわ ただし 虻川 匡司 やまもと はじめ 山本 孟	教授 准教授	48
		スピン量子物性 Quantum Spin Physics Group	さとう たく 佐藤 卓 なわ かずひろ 那波 和宏 きんじょう かつき 金城 克樹	教授 准教授 助教	49
		電子線ナノ物理* Electron Crystallography and Spectroscopy Group	あぶかわ ただし 虻川 匡司 さとう ようへい 佐藤 庸平 まつもと たかとし 松本 高利	教授 (兼任) 准教授 助教	50
		結晶構造物性* Structural Physics and Crystal Physics Group	さとう たく 佐藤 卓 やまもと はじめ 山本 孟	教授 (兼任) 准教授	51
	量子機能計測講座 Quantum Measurement and Functional Sensing  <sup>1</sup> 連携大学院: 理化学研究所 RIKEN  <sup>2</sup> 連携大学院: 情報通信研究機構 National Institute of Information and Communications Technology	量子機能計測 Quantum Measurement and Functional Sensing Group	おおたに ちこう 大谷 知行  やぶの まさひろ 藪野 正裕	教授 <sup>1</sup> (客員) 准教授 <sup>2</sup> (客員)	52

# 素粒子・宇宙理論グループ

Particle Theory and Cosmology Group

隅野 行成 教授 高橋 史宜 教授 山口 昌弘 教授

石川 洋 准教授 中山 和則 准教授 山田 將樹 准教授 米倉 和也 准教授

北嶋 直弥 准教授 堀田 昌寛 助教 山田 洋一 助教

<http://www.tuhep.phys.tohoku.ac.jp/>

素粒子物理学は物質の究極の姿を対象とする分野です。物質の最も基本的な構成要素である素粒子と、自然現象を支配する最も基本的な物理法則としての素粒子間の相互作用を明らかにすることを目的としています。

素粒子物理学の基礎となっているのは量子力学と特殊相対性理論です。素粒子物理学の対象は物質のミクロな構造ですが、短い距離を探ることは量子力学の不確定性関係により高いエネルギー領域に対応します。このことは、素粒子物理が高エネルギー物理ともよばれる所以でもあります。素粒子を記述するには相対論的な場の量子論が用いられ、その中でもゲージ理論と呼ばれるものが特に重要です。現在知られている基本的相互作用である電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用、重力相互作用の4つのうち、重力以外の3つはゲージ理論で記述されます。さらに、ゲージ理論が弱い相互作用を正しく記述するためにはゲージ対称性の自発的破れという現象が起こっていないければなりません。これを引き起こすヒッグス場の素励起であるヒッグス粒子は2012年に発見されました。場の量子論に基づき3つの力と物質粒子を記述する理論は素粒子の標準模型 (Standard Model) と呼ばれ、その構築は20世紀後半の物理学における最も重要な達成の一つであると言ってもよいでしょう。

標準模型は豊かで美しい構造を持った理論ですがその形は極めてシンプルです。これまでに標準模型が持つ様々な性質の実験的な検証が行われ、ほとんどの実験データが高い精度で説明されることが確かめられてきました。しかし、この理論には未解決の大きな謎がいくつか残されています。例えば、

- 強い相互作用の理解
- 電弱スケールの安定性、ニュートリノ質量の起源、力の統一

- 宇宙論で必要とされるインフレーション、暗黒物質、物質反物質非対称性
- 重力 (一般相対性理論) との整合性

といったものの解明は今後の課題です。

標準模型を超えた新たな素粒子現象を探索するため、新しい加速器の建設や既存の加速器の改良が行われており、高エネルギー最前線、精密測定の方両方向での実験が計画されています。素粒子理論の発展のためには、高精度で物理現象を解析すること、およびそれらを記述する場の量子論を深く掘り下げて理解することが不可欠です。中でも強い相互作用を記述する量子色力学 (QCD) を理解することが標準模型の精密検証において重要となります。QCDは強結合の理論のため、一般にその解析は容易ではありません。高エネルギーでは (クォークやグルーオンといった素粒子が自由粒子のようにふるまう) 漸近自由性という性質を持ち、具体的な解析が可能となります。一方で、核子 (陽子や中性子) のような低エネルギーではクォークが単独で存在できないというカラーの閉じ込め現象など、純理論的にも興味深い性質を持つことが期待されます。QCDをはじめとする場の量子論をより深く理解することが今後の素粒子物理学の発展のためには重要です。

素粒子は最もマクロな構造である宇宙とも深く関わっています。宇宙初期の高温の時期には素粒子が宇宙論の主役を演ずるためです。宇宙の誕生直後には、真空の大きなエネルギーによってインフレーションと呼ばれる急激な膨張が起こったと考えられています。この宇宙の急激な膨張の後に真空のエネルギーが輻射として解放され、熱いビッグバン宇宙が始まり、膨張による冷却といくつかの相転移を経て今日の宇宙へと進化してきました。加速器実験では到達できない超高エネルギー、ある

いは長時間かけてやっと相互作用するような弱結合領域の物理が、宇宙の進化に重要な役割を果たすと考えられています。したがって、宇宙初期を研究するには素粒子物理学の知識が必要不可欠であり、逆に、初期宇宙の研究から素粒子物理学に対して新たな知見が得られると期待されます。こうした観点から素粒子物理学に立脚した初期宇宙の研究が、最近の宇宙背景放射、重力レンズ、原初元素組成など宇宙観測の発展にも刺激されて活発に進められています。とりわけ、現在の宇宙の組成の大部分は暗黒エネルギー、暗黒物質によって占められていることが明らかになっていますが、これらは素粒子の標準模型の枠内では説明できず、新たな理論が必要とされています。

標準模型に含まれていない重力はもっとも古くから知られた相互作用であり、古典論としては一般相対性理論という美しい理論で記述されます。しかし、量子力学的な重力（量子重力）の理論は未完成です。量子重力を含む全ての相互作用を統一する理論の有力な候補として超弦理論があります。超弦理論は重力の量子である重力子の存在を必然的に予言します。超弦理論には5つの異なる種類の理論が知られていましたが、これらがただ一つの理論の別々の側面を見ているだけであることが双対性の発見によって明らかになりました。このことから超弦理論は過去のどんな物理理論とも違い一切変更の余地のない理論であり、そのため基礎物理学の最終理論として期待されています。

統一理論としてのみならず、超弦理論は極めて豊富な数理的構造を持っており、場の量子論や数学、物理の他分野などと影響を与え合い発展をしています。概念的にも、例えば反ドジッター（AdS）時空での量子重力理論と、重力を含まない場の量子論の間に AdS/CFT 対応と呼ばれる双対性があるなどの驚くべき発見をもたらしています。そのように、超弦理論が場の量子論の数理的発展をもたらし、また場の量子論の発展もいまだ未完成である超弦理論の様々な側面の理解を深めるのに欠かせません。あまりに豊富な構造を持つゆえまだその全貌がはっきりと分からず、理解を積み上げることが重要です。

当研究室では、これら素粒子理論および素粒子的宇宙論の研究を広範囲にわたって行っています。以下に主なものを挙げます。

### (1) 高エネルギー現象の理論的研究

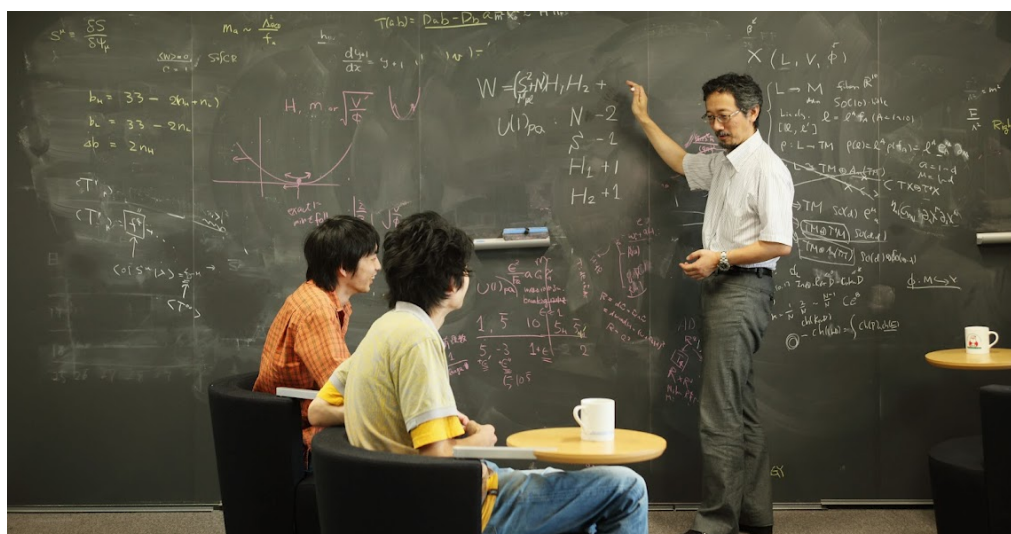
稼働中および計画中の加速器実験における素粒子現象、および様々な精密測定における新現象の出現についての理論的研究を行っています。

### (2) 初期宇宙の研究

素粒子理論に立脚した統合的宇宙論の構築とその観測的検証を主眼として、インフレーション模型、物質反物質非対称性生成、暗黒物質模型、密度揺らぎの進化に関して研究を進めています。

### (3) 超弦理論や場の量子論の研究

超弦理論や場の量子論が持つ数理的な構造を解明するための研究を進めています。



# 原子核理論グループ

Nuclear Theory Group

肥山 詠美子 教授 佐々木 勝一 准教授 渡邊 和宏 准教授

小野 章 助教 神谷 有輝 助教

<http://www.nucl.phys.tohoku.ac.jp/>

原子核理論研究室では、自然界で知られている4つの基本相互作用の一つである「強い相互作用」—量子色力学 (QCD)—について、その理論的基礎から現象論的側面に至るまで、多彩な手法を通して幅広く研究を行っています。

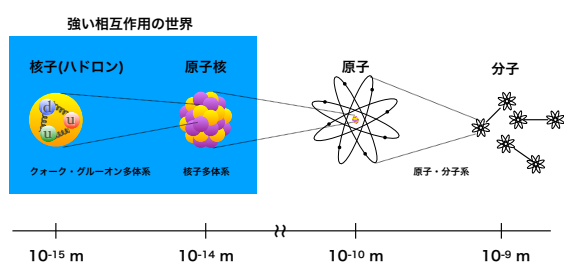


図1. 長さのスケールで見る階層性と強い相互作用の世界。

図1は分子から素粒子までの階層構造を表していますが、強い相互作用は、約  $10^{-14}$  m 以下のマイクロな世界でのみ働く力です。QCDにおける素粒子はクォークとグルーオンと呼ばれる粒子で、「色電荷」を持っています。これらの色電荷を持ったものが中性になるように集まって、核子（陽子・中性子）といった重粒子や  $\pi$  中間子といったハドロンと呼ばれる複合粒子を形作ります。これらは原子核物理の基礎的な自由度であると同時に、相互作用を媒介する粒子ともなります。

原子核物理においては、以上のハドロン自由度のダイナミクスの多彩さに加えて、量子多体系独特の質（集団運動、クラスター化、量子カオスなど）がさらに加わり、豊かな原子核構造が生み出されます。さらには、クォークにもいくつかの種類（フレーバー）があることを反映して、核子以外にもハイペロンと呼ばれるストレンジネス荷を持つクォークを含む重粒子が存在します。通常の核子に加えてハイペロンを加わった原子核をハイパー核と呼びます。

原子核理論で扱う物理は学際的意義を強く持っています。例えば、核子などが極限まで巨

視的に集まってできる中性子星の研究においては、原子核構造からクォーク自由度に至る物理の理解が欠かせません。また、原子核物理の量子多体系・物性物理としての側面に注目して、スケールの異なる階層の量子系（例えば原子物理）に共通に現れる普遍性を抽出する試みがなされており、「強く関連する量子系」をキーワードに研究の範囲が広がっています。

当研究室では、次に挙げる具体的なテーマについて、教授・准教授が中心となるサブグループ毎に研究を行っています。

**ハドロンと格子QCD**：QCDには低エネルギーにいくほど相互作用が強くなるという性質があり、相互作用を摂動論的に扱う手法が使えなくなります。QCDを非摂動的に計算する方法として考案されたものが、「格子QCD」と呼ばれる数値的手法です。

ハドロン物理学は、研究対象となるハドロンが「強い相互作用をする物質」ということで原子核物理学の一分野として位置づけられています。理論的手法は素粒子論の基礎となる場の量子論およびゲージ理論に基づいており、素粒子・原子核にまたがる横断的な研究領域です。

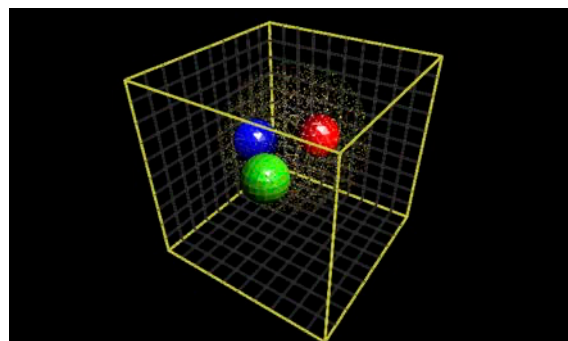


図2. 格子QCDのイメージ図（計算の便宜上、クォーク、グルーオンを格子状に配置して第一原理計算を行います）。

**高エネルギーハドロン・原子核物理**：CERNのLHCやBNLのRHICといった加速器実験では、光速近くまで加速された高エネルギーの陽子や原子核を衝突させることで、強い相互作用の研究が行われています。衝突により陽子や原子核は破碎され、ハドロン内部に閉じ込められたクォークやグルーオンの散乱が起こるため、観測された粒子の解析を通じて、クォークとグルーオンのダイナミクスやハドロンの量子構造を解明することが可能です。また、標的原子核の核種を変更することで衝突システムのサイズを制御できるため、初期宇宙に存在したクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の生成やその物性を調査できます。さらに、終状態のハドロン対運動量相関を解析するフェムトスコピーと呼ばれる手法を用いることで、低エネルギー散乱実験で扱うのが難しいハイペロンなどのハドロン間相互作用の特定や共鳴状態の研究が盛んに行われています。

これらの研究の一部は、2032年頃に本格稼働予定のBNLにおける世界初の電子-原子核衝突型加速器 (EIC) 実験によって、さらなる高精度化が期待されています。本研究室では、国際的な高エネルギー実験グループと密接に連携し、さまざまな理論的枠組みを適用することで、高エネルギーハドロン・原子核物理における新たな現象の解明を目指しています。

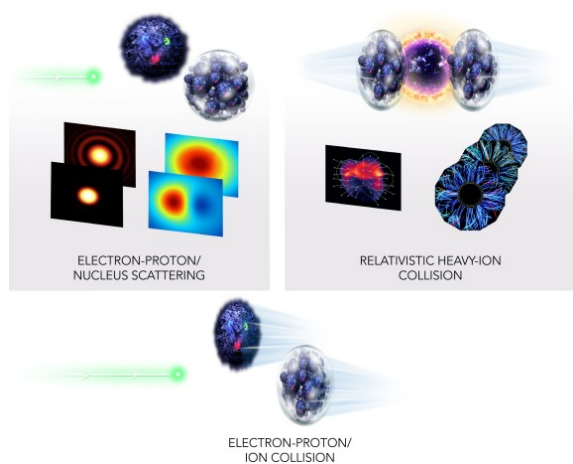


図 3. 高エネルギー衝突実験のイメージ図 (P. Achenbach, et al. “The present and future of QCD,” Nucl. Phys. A 1047, 122874 (2024) の Fig.1 より)

**原子核の微視的理論**：原子核は核子が自己束縛している状態で、陽子と中性子それぞれの個数やその励起エネルギーの与え方の違いによって、多様な性質が発現します。原子核やその反応に現れる運動には、核子の軌道運動による独立粒子的な面と、振動や回転、圧縮や膨張といった多数の核子の寄与による集団的な面があり、さらにはそれらが複合した状態や少数の核子で組を作るクラスター相関の発現などもあります。これらの多様な現象や核子からなる物質の性質の統一的理解を目指し、主に核子自由度に基づく微視的なアプローチを用いて研究を進めています。

**少数多体系問題からみた原子核、クォーク多体系、原子分子**：近年の物理の興味ある課題の中には、少数粒子系 (3体以上) のシュレディンガー方程式を「精密に」解くことに帰着するものが多く存在します。「精密に」解くことによって、新しい物理を発見することが多々あります。そのため、この方程式を精密に解き、かつ、広く適用できる計算法を確立することが重要となります。

本研究室では、「無限小ガウス・ローブ基底関数」を用いたガウス展開法を独自に開発することで少数多体系の精密計算法を可能にし、原子核、ハドロン、原子分野に幅広く適用しています。多体系の解法を信頼できるものとすることで、例えばハイペロンを含む多体系のスペクトルから正しいハミルトニアンを推定することが可能となります。少数多体系の問題は様々な分野で難しい問題として残されており、今後の研究展開が期待されます。

**量子系における普遍性**：多粒子系が示す相転移・臨界現象では、気液相転移と強磁性転移の例をはじめ、全く異なる系が統一的に理解できる普遍性 (ユニバーサリティ) という重要な概念があります。少数粒子系においても、原子、原子核、固体電子系などが全く同じ量子少数系の現象 (例えばエフィモフ状態と呼ばれる3粒子現象) を示すことがあり、このようなユニバーサリティに着目した研究を進めています。

# 物性理論（理学部）グループ

Theoretical Condensed Matter and Statistical Physics Group

是常 隆 教授      柴田 尚和 教授

内田 就也 准教授      佐藤 駿丞 准教授      那須 譲治 准教授

泉田 渉 助教      小野 淳 助教      中島 龍也 助教

村島 隆浩 助教      森田 克洋 助教

<http://www.cmpt.phys.tohoku.ac.jp/>

物性理論グループでは、様々な物質の振る舞いを理論的に解明する研究を行っています。以下に私たちのグループの目指すものと研究教育環境について紹介します。

## 物性理論の目的

物質の構成要素となる素粒子やそれらに働く力の種類は少数に限られているにも関わらず、身近な物理現象はとても多彩です。その多様性は、原子や電子自身の性質を明らかにすれば理解できるものではなく、それらが多数集まることよってはじめて現れるものです。そこで生じる様々な現象に対して、その本質を抽出し、内に秘めた普遍的な性質を明らかにすることが物性理論の研究目的です。身の回りの現象は既にわかっているものと考えがちではありますが、そこには個々の構成粒子の性質からは全く予想できない多様性があり、還元的な思考では想像も付かないほどの驚きと魅力で満ちあふれています。

## 物性理論の研究対象

物性理論は、身の回りで起こる現象を広く研究対象にしています。多彩な構造と特性を示す固体物質や、環境に応じて様々な形状を取り得る柔らかい物質、そして構成要素自身が運動特性を有する生物などの性質を、構成粒子の集団的性質や集団運動に注目して明らかにすることが主要なテーマとなっています。多数の構成粒子によって形成される一般的な多体系を、微視的運動方程式に基づいて解析的に厳密に解くことは不可能です。一方で、扱う多体系の本質は、少数パラメータで記述される簡素な法則で与えられることも多いです。

物性理論研究においては、そのような現象を理解するための簡素化された多体模型を考え、それに対して摂動展開などの近似方法を

適用する解析的手法や、その模型をスーパーコンピュータなどの大規模計算機を用いて解析する数値的手法が用いられています。いずれにせよ、一体問題とは一線を描いた多体系独自の本質を支配する新しい普遍性を見いだすために、様々な手段を用いて研究を行っています。

多種多様な研究対象がある中で、本物性理論グループは、本学が特に強みとする材料科学やスピントロニクスの中核となる電子系・磁性分野において、先駆的な研究を展開しています。加えて、近年の研究手法や新しい概念の発展に伴って、他分野との「境界領域」である、トポロジー、非平衡現象、ソフトマター、ナノ構造物質、量子情報といった数学、化学、生物学、工学、情報分野にまたがる研究も盛んに行われています。実験研究との連携においても、物性理論の果たす役割はますます重要になっています。

## 研究室の構成と特徴

大学院での教育・研究は、教授・准教授が中心となる小グループを組織することで、教員と大学院生との個別的な指導により行われています。大学院生は、教授もしくは准教授を指導教員に指定して研究を進めていくこととなりますが、物性理論グループ全体でも、コロキウム、共通計算機の利用、懇親会など、幅広い交流が行われています。特に物性理論交流室では、くつろいだ雰囲気の中で指導教員以外の教員とも自由闊達な議論が行われています。学生は、この交流を積極的に利用することで広い視野を持つことができます。

さらに、本グループは、国際的環境にも恵まれています。毎年多くの外国人のビジターが訪れるだけでなく、外国人のポスドクや学生も本グループに在籍しており、日々の研究活動の

中で語学力や異文化の理解、さらに国際的な視点を自然に身につけることができます。

本専攻には多くの物性分野の実験研究室があり、また、金研・多元研などの研究所とも協力関係にあります。青葉山キャンパスには放射光施設 NanoTerasu が設置されたことから、今後も、青葉山・片平地区内での密接した研究連携が期待できます。

本グループは、質・量ともに国内外で最大級の物性理論グループであるだけでなく、物性分野において国際的評価の高い研究室が集まる立地を生かして理論研究が実施できる非常に恵まれた環境にあります。物性理論の研究を志望する皆さんには、これらの卓越した環境を生かして、物理学に新しい貢献をもたらす研究の最先端をめざすと同時に、基礎的な物理の知識も広く学ぶことを希望しています。

### 各教員の現在のテーマ

各教員の主なテーマ(キーワードのみ)を以下に示します。詳細に関しては各教員に問い合わせたり、Web ページを参照してください。指導教員として選択可能な教員には◇印を付けています。

**是常 隆** ◇ 第一原理計算に基づく物性解明と物質設計を目指した研究。特に電子格子相互作用やスピン軌道相互作用が絡む物性。超伝導、磁性、異常ホール効果など。

**柴田 尚和** ◇ 低次元強相関電子系の理論。スピン液体、電荷ストライプ、量子固体など、強相関電子系の多彩な電子状態の数値的研究。

**内田 就也** ◇ 生物などの非平衡系の協力現象とパターン形成、非線形ダイナミクス、同期現象、アクティブマター。

**佐藤 駿丞** ◇ 光物性理論、特に光によって駆動されるアト秒・フェムト秒時間スケールの超高速現象の第一原理計算。

**那須 譲治** ◇ スピンや軌道といった複数の自由度が強い電子相関によってもつれ合うことで現れる現象に対する理論研究。

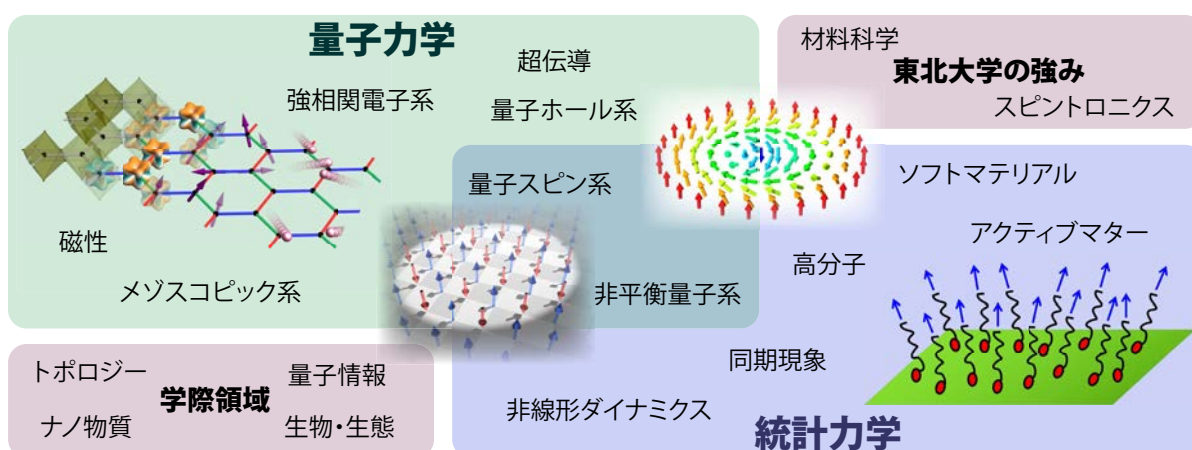
**泉田 涉** カーボンナノチューブや量子ドット、ナノメカニクスなどのメゾスコピック系・ナノマテリアル。

**小野 淳** 強相関電子系における光物性。特に光誘起相転移や超高速現象に関する理論的、数値的研究。

**中島 龍也** 半導体における低次元電子系の理論的研究。特に量子ホール効果。

**村島 隆浩** 高分子物理、レオロジー、非平衡分子動力学、マルチスケールシミュレーション。

**森田 克洋** 量子格子模型に対する数値的・理論的解析。スーパーコンピュータや量子コンピュータ向けの手法開発と物性解析への応用。



物性理論グループの研究テーマ。

# 金研理論物理グループ

IMR Theoretical Physics Group

野村 悠祐 教授

村上 雄太 准教授

陳 曉邑 助教

森 仁志 助教

<https://www.nomura-lab.imr.tohoku.ac.jp>

当グループは、量子物性・非平衡物性の理解と設計を目指す物性理論の研究室です。

**研究の目的:** 強い力により相互作用する素粒子を扱う素粒子物理から、クーロン力により相互作用する多電子系を扱う物性物理に至るまで、エネルギースケールに違いはあるものの、これらの分野には、強い相関をもつ量子多体系という共通点があります。量子性と多体性の兼ね合いによって生じる創発的な量子現象や非自明な非平衡物性を理解することは、自然界の根本原理を探ることに他なりません。また、超伝導や磁性などの量子現象はデバイス応用にもつながるため、物性物理は基礎・応用の両面で重要な研究分野です。

当グループは、理論研究の立場から、量子物性・非平衡物性の多様性を物質によらない普遍的な理論手法を用いて解析し、多様性の背後にある本質的な物理の解明を目指します。物性予測のための知見を積み重ねることで、理論物理学における新たな概念の創出につなげるとともに、理論主導の物質・物性設計という量子多体研究のフロンティアを開拓しています。

**研究手法:** スーパーコンピュータを用いた数値解析、機械学習に基づくデータ科学的新手法、次世代の計算手法である量子コンピューティングなどの、最新鋭の計算技術を用いることで量子物性と非平衡物性の第一原理的研究を行います。理論的考察によって、数値計算結果から本質を抽出し、物性予測のための指導原理の確立を狙います。

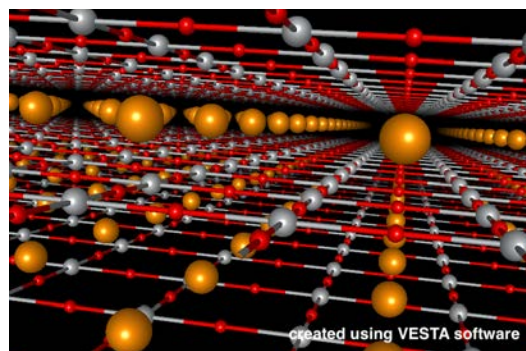
**研究内容:** 研究テーマをいくつか紹介します。

- 超伝導と量子スピン液体： $U(1)$  ゲージ対称性の破れを伴い電気抵抗が消失する超伝導と、対称性の破れを一切伴わずにスピンの絶対零度でも揺らぐ量子スピン液体は、一見全く異なる現象のように思えます。しかし、素粒子であるはずの電子が物質中では分裂して新たな粒子のように振る舞う非自明な創発現象（分数化）が両者をつなぐ普

遍的な概念である可能性があります。このように多様な現象の中に潜む普遍性を探ることは物性物理の醍醐味の一つです。

- バンドエンジニアリング：例えば、層状物質において、各層を構成する元素の組成や構造を変更することによって物質のバンド構造を制御し（バンドエンジニアリング）、物質の機能を向上できる可能性があります。このテーマに関しては、層状ニッケル酸化物における超伝導物質候補の理論提案を行うなど物質設計の最前線を追求しています。
- 量子多体系の光誘起現象：物質を強い光で駆動することで、平衡系では思いもよらなかった現象が発現します。例えば、光誘起超伝導のような物性の超高速制御が可能になったり、高次高調波などの特異な非線形光学応答が生じます。数値計算を駆使してこれらの現象を解析し理解することで、新しい物性制御やデバイス応用に向けた道を模索しています。

**研究環境:** 充実した設備（居室・計算機など）のもとで、スタッフや研究室の仲間と活発に議論ができる研究環境を提供します。また、国内はもちろんのこと世界中の実験・理論グループとも連携し、共同研究を展開することで、視野を大きく広げることができます。



図：層状物質の結晶構造のイメージ図。当グループでは構造予測まで含めた物性の理論設計を目指します。

# 素粒子実験（加速器）グループ

Elementary Particle Physics (Accelerators) Group

市川 温子 教授      中村 輝石 准教授      Lukas Berns 助教      芦田 洋輔 助教

<https://epx.phys.tohoku.ac.jp/eeweb/>

Email: [atsuko.ichikawa.c6@tohoku.ac.jp](mailto:atsuko.ichikawa.c6@tohoku.ac.jp)      Tel: 022-795-5730

私達はまだ、素粒子のさまざまな性質の起源や、宇宙の物質がどのように現在に残ったのかについて理解していません。これらの謎を解明するために、当研究室では加速器を用いてニュートリノを生成し 295 km 走行後の性質の変化を測定する、あるいは新しい検出器を作りニュートリノの特異な性質を捉えることを目指しています。

## 加速器長基線ニュートリノ振動実験

私達の宇宙には物質のみが満ちていて、反物質は見当たりません。これは、現代の科学では説明できない謎です。これに対し、素粒子標準理論に「重いニュートリノ」という新たなピースを導入することで、ニュートリノの極端に軽い質量、そして宇宙における物質と反物質の非対称の生成などのパズルを解くことができるという有力な説があります。この仮説を検証するには、「ニュートリノにおける粒子・反粒子対称性（CP 対称性）の破れ」を見つけること、そしてニュートリノが自身を反粒子とする「マヨラナ粒子」であるかどうかを突き止めることが重要です。

当研究グループでは、国際共同実験 T2K（ティーツーケー）およびハイパーカミオカンデ計画を推し進め、「ニュートリノにおける CP 対称性の破れ」の探索を進めています。



図 1. T2K 実験の概念図。

T2K 実験は図 1 のように茨城県東海村にある J-PARC 加速器により生成したニュートリノあるいは反ニュートリノを 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡にあるスーパーカミオカンデ検出器で測定します。2020 年までの測定で CP 対称性が破れている可能性が 95%程度という結果を得ています。

CP 対称性が破れているかどうかを結論付けるためには、もっとデータ量を増やし、また測定の精度を上げる必要があります。そのため、当研究グループではニュートリノビームの強度を上げるために必要な装置の開発、測定精度を上げるためのニュートリノ検出器の製作、新しいデータ解析手法の開発を行いつつ、データ取得を進めています。

スーパーカミオカンデは 5 万トンの水を用いてニュートリノを検出していますが、ハイパーカミオカンデ計画では、26 万トン水を有する検出器を新たに作り約 8 倍の効率でニュートリノを捉えます。図 2 はハイパーカミオカンデ検出器の概念図です。今後、T2K 実験、そして 2028 年頃開始予定のハイパーカミオカンデ実験によりニュートリノは CP 対称性を破っているのか、破れているとしたらその大きさを決定することを目指します。

これらの実験ではニュートリノのフレーバーと呼ばれる種類と質量の関係も精密に測定し

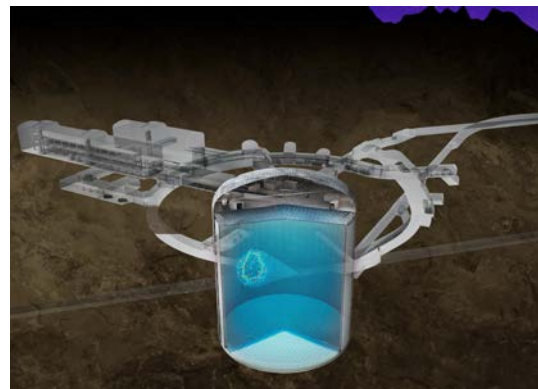


図 2. ハイパーカミオカンデ検出器の概念図。

ます。最近、宇宙観測によるダークエネルギーの性質の解明においても、ニュートリノの質量の情報が重要になっています。スーパーカミオカンデおよびハイパーカミオカンデでは陽子の崩壊や、超新星爆発をはじめとする天体活動から放出されるニュートリノも探しています。フレーバーと質量の関係、そして陽子の崩壊は、自然界の三つの相互作用（電弱強）、そしてクォークとレプトンを統一的に扱うとされる（まだ未完成の）大統一理論への重要な情報です。天体活動から放出されるニュートリノを検出することは、光学観測や重力波観測と合わせたマルチメッセンジャー天文学を促進する強力な手段となっています。

### ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索

前述の「重いニュートリノ」のシナリオを成り立たせるには、ニュートリノが自身を反粒子とする「マヨラナ粒子」でなければなりません。そこで、「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊」という特殊なベータ崩壊の探索が世界中で進められています。ある種の原子核では、ベータ崩壊が2回同時に起きる二重ベータ崩壊が起きます。その時、反ニュートリノが2個放出されるのですが、ニュートリノがマヨラナ粒子の場合には、ごく稀にこの二つの反ニュートリノが対消滅して「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊」を起こすのです。

私達の進めている AXEL（アクセル）実験も「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊」を探索しようとしています。AXEL 実験では、二重ベータ崩壊核であるキセノン-136 を高圧なガス状態で検出器媒体として用います。私達

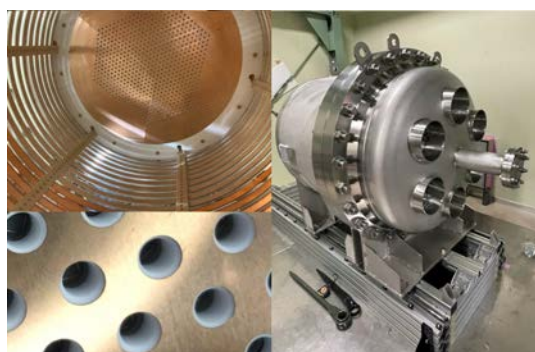


図3. 左：AXEL プロトタイプ検出器の内部の様子。右：岐阜県飛騨市神岡町の地下実験施設に設置された1,000リットル検出器の容器。

の開発した新しい原理により、高い分解能でエネルギーを測定し、また二つのベータ線が放出される様子も捉えることができます。図3は現在開発中の AXEL 検出器のプロトタイプと、次期1,000リットル検出器の写真です。どちらも大学院生が中心となって作りました。図4は、プロトタイプ検出器で捉えた2.6 MeVの電子の飛跡です。今後、プロトタイプ検出器の6倍の大きさである1,000リットルの検出器を建設して岐阜県飛騨市神岡の地下で測定開始するとともに、さらに100 kgクラスの検出器での探索へと進む予定です。

RL deconvoluted, Elevation: 26.5deg, Azimuth: 271.0deg

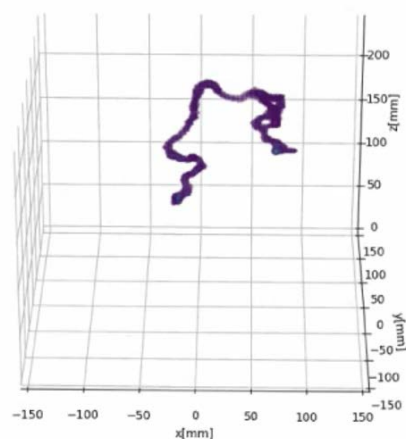


図4. AXEL 検出器で捉えた2.6 MeVの電子の飛跡。

### その他

T2K 実験、ハイパーカミオカンデ実験、AXEL 実験の他にも色々な活動を行っています。AXEL 検出器を改造して、最近、暗黒物質探索で利用されているミグダル効果を実際に測定する MIRACLUE（ミラクル）実験を行っています。また、加速器技術の応用・開発も行っています。

# 素粒子実験（ニュートリノ）グループ

Elementary Particle Physics (Neutrino) Group

井上 邦雄 教授    岸本 康宏 教授    清水 格 教授  
池田 晴雄 准教授    池田 一得 准教授    市村 晃一 准教授  
石徹白 晃治 准教授    古賀 真之 准教授    渡辺 寛子 准教授  
竹内 敦人 助教    Bae Hanwook 助教    細川 佳志 助教

<http://www.awa.tohoku.ac.jp/>

Email: [office@awa.tohoku.ac.jp](mailto:office@awa.tohoku.ac.jp)    Tel: 022-795-6723

## 非加速器素粒子実験

自然や宇宙は巨大な素粒子実験室です。身の回りには宇宙創成期、進化期の情報を持った素粒子が飛び交い、地球や太陽、銀河からは絶えず素粒子が放出され、地上に降り注いでいます。これらの粒子を検出して素粒子や宇宙を研究することが、非加速器素粒子実験の目的となっています。

中でもニュートリノは弱い相互作用しかしないため、宇宙初期から太陽内部、星の終焉、地球内部の情報までも直接現在の我々人類に伝えてくれます。さらに、ニュートリノの極端に軽い質量構造や、ニュートリノ間の結びつきは、素粒子大統一理論を反映しており、宇宙が物質のみから構成されている事の原因とも考えられます。このようなニュートリノの研究は、素粒子物理学はもちろん宇宙物理・地球物理学の今後の展開を方向付ける重要な研究課題です。

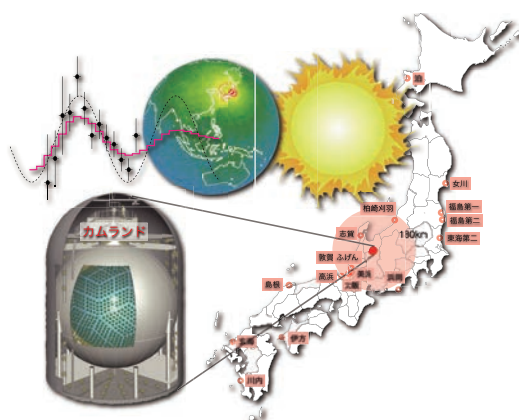
## カムランド実験

当研究グループは、①原子炉反ニュートリノ観測によるニュートリノの性質の特定、②地球内部反ニュートリノ検出による地球内放射化熱量の観測、③太陽ニュートリノ検出による恒星進化の研究を主目的とした、1,000トン液体シンチレータ検出器を岐阜県飛騨市神岡鉱山の地下1,000mに完成させ、2002年からデータ取得を開始しました。カムランドの液体シンチレータは通常の物質と比べて1兆分の1程度しか放射性不純物を含んでおらず、希な現象の研究に適した極低放射能環境を実現しています。

この検出器によって原子炉からの反電子ニュートリノ観測を行い、ニュートリノの見か

けの数が距離とともに減少・復元を繰り返すニュートリノ振動を2サイクル以上にわたって捉え、30年以上未解決であった太陽ニュートリノの謎を解決するとともに、ニュートリノ振動パラメータの精密測定を達成しました。

また、地球内部からのニュートリノの観測にも世界で最初に成功し、ニュートリノをプローブとして利用した地球内部の観測「ニュートリノ地球物理」を切りひらきました。このニュートリノは地球内部の放射性物質が崩壊する際に熱と共に放出され、その観測で得られる情報は地球内放射性熱量に換算することができます。更に地球形成・発展の研究、地磁気生成、マントル対流といった地球ダイナミクスの研究への展開が期待されています。観測精度の向上により地球内熱量に占める放射性物質起源の熱の寄与の割合を検証できるようになってきていますが、特に停止している国内原子炉が多い現状は地球ニュートリノ観測の精度向上に適しており、急速な発展が見込まれます。

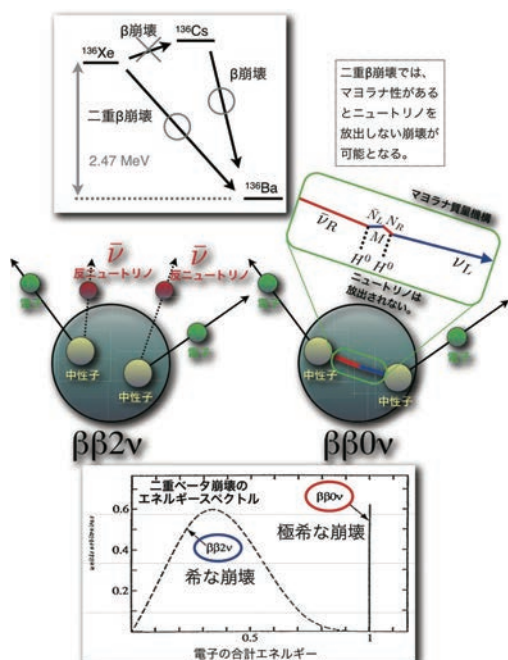
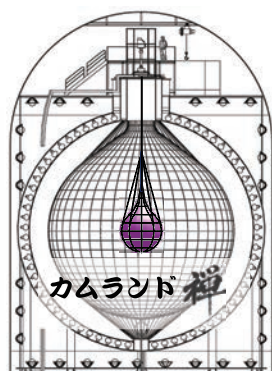


さらなるニュートリノ利用の実践として、太陽ニュートリノ観測による太陽内部の直接観測とそれによる恒星進化の究明、超新星爆発

ニュートリノの観測による宇宙の進化の研究、重力波望遠鏡と連携したマルチメッセンジャー宇宙観測なども推進します。

### カムランド禅実験

カムランドの極低バックグラウンド環境を活用した  $^{136}\text{Xe}$  を使ったニュートリノレス二重ベータ崩壊の研究プロジェクト「カムランド禅」を推進しています。カムランド検出器中心部にミニバルーンを導入して  $^{136}\text{Xe}$  ガスを溶かした液体シンチレーターで満たし、 $^{136}\text{Xe}$  の崩壊によるニュートリノレス二重ベータ崩壊の観測を目指します。ミニバルーンの外側のカムランドの液体シンチレータの領域はニュートリノ観測を同時並行で行うことができます。



ニュートリノレス二重ベータ崩壊の研究は、ニュートリノと反ニュートリノの同一性（マヨラナ性）を調べる現実的な唯一の研究手法です。また、ニュートリノの質量構造も決定する

こともできます。マヨラナ性の解明はニュートリノの質量生成機構や、宇宙が物質だけでできていることに対して強い関係があると考えられており、素粒子標準理論を越えたこれらの謎の究明の最有力手法として世界中で激しい競争が繰り広げられています。2011年から2015年に380 kgのキセノンを用いて観測を行い、2019年から2024年はより半径の大きなミニバルーンを導入し745 kgまでキセノンを増量して更なる高感度実験を行いました。これまでにニュートリノレス二重ベータ崩壊の半減期に対して世界で最も厳しい制限を与え、世界の競合実験に先駆けてマヨラナ質量の逆階層構造領域の検証を開始しています。

今後も競合実験をリードし続けるには、検出器の高性能化が必要です。2024年には22年に渡るカムランドのデータ取得を終了し、現在は改良計画の「カムランド2」の開始に向けて検出器の大規模改修作業を行なっています。検出光量を増加させエネルギー分解能の向上によるバックグラウンドの更なる低減を目指し、高光量液体シンチレータ、高量子効率光センサー、集光ミラーの導入を予定しています。ニュートリノレス二重ベータ崩壊事象の発見に向けて実験開始の準備を進めていきます。

また当研究グループでは、多様な物理観測を目指した新たな実験・解析技術の開発や、更なる検出感度向上に向けた様々な研究を行っています。

- 粒子識別を目指したイメージング検出器の開発
- 機械学習によるイベント再構成とバックグラウンド同定
- バルーンフィルムに含有する放射性バックグラウンド同定のための発光性バルーンの開発
- 超電導センサーと低放射能希釈冷凍機による軽い暗黒物質探索
- 共振空洞によるアクシオン探索
- 極稀事象探索のための極低放射能技術開発
- マントル地球ニュートリノ直接観測を目指した海洋底ニュートリノ検出器の開発

当研究グループは日米欧の国際協働実験であるカムランド・カムランド禅実験を推進していくと共に、多様なアイデアによる将来発展を目指した研究開発や異分野も含む国内外共同研究も積極的に推進しています。

# 原子核物理グループ

Experimental Nuclear Physics Group

三輪 浩司 教授 田村 裕和 特任教授 (研究)\*

市川 裕大 准教授 岩佐 直仁 准教授 金田 雅司 准教授

三木 謙二郎 准教授 鵜養 美冬 准教授 (兼任)

小山 俊平 助教 七村 拓野 助教 早川 修平 助教

<http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/>

Email: [koji.miwa.c4@tohoku.ac.jp](mailto:koji.miwa.c4@tohoku.ac.jp) Tel: 022-795-6448

クォークが核子や原子核などの物質を形作ったことで進化した宇宙。その歴史をクォークに働く強い力に基づいて解き明かし、核子、原子核、そして中性子星までを統一的に記述することが原子核物理の大きなテーマです。当研究室ではこの宇宙の物質進化がたどった様々なプロセスを、ストレンジクォークを含んだハドロン・ハイパー核の研究や陽子・中性子のバランスが大きく崩れた不安定核の研究などを通して体系的に解明しようとしています。

## 1. ストレンジネス核物理

通常の原子核はアップクォークとダウンクォークで構成されますが、ストレンジクォークを含んだハドロンや原子核の研究はクォークと核子の階層を繋いで物質の進化を理解するために重要な役割を果たします。クォーク多体系の最小形態は3つのクォークからなるバリオンとクォーク・反クォークからなる中間子ですが、その分類を外れたエキゾチックなハドロン(6クォーク状態や中間子とバリオンの分子状態)を調べることで、ハドロン形成の謎に新しい情報を与えることができます。また、原子核がなぜ形成されるのかを理解するには、核力をクォークの階層から理解する必要があり、そのためにはストレンジクォークを持つ粒子(ハイペロン)も含んだ核力(バリオン間力)の詳細をハイパー核構造やハイペロン核子散乱などから実験的に明らかにすることが不可欠です。また、物質進化の最終形態である中性子星の中心部では、重力による圧縮で通常の原子核に比べ数倍も密度の高い環境が形成されます。これは高エネルギーの中性子がハイペロンにベータ崩壊しうる特異な環境であり、ストレンジクォークが安定に存在する未知の物質層が存在すると考えられます。バリオン間力を解明し、また原子核内でのハイペロンの運動からハイペロンが核内で感じる力の正体を暴き出すことで、中性子星内でハイペロンがどのように出現す

るか解き明かそうとしています。当グループでは、ハイパー核などのストレンジクォークをもつハドロン多体系の物理(ストレンジネス核物理)の実験研究をJ-PARC(茨城)の大強度 $\pi/K$ 中間子ビームや本学RARIISの実光子ビームなどを用いて以下のように推進しています。これらはいずれも世界の最先端を切り拓く研究で、我々は世界有数のストレンジネス核物理の研究拠点となっています。

(1) **ハイペロン・陽子散乱実験:** 我々はJ-PARCの大強度中間子ビームと自ら開発した高速時間応答の検出器CATCH(図1左はCATCH内のファイバー検出器)を用いて、世界で初めてシグマ( $\Sigma$ )粒子と陽子の散乱微分断面積の高精度測定に成功しました。現在、 $\Lambda$ 粒子と陽子との散乱実験をSPring-8およびJ-PARCで計画しており、その準備を進めています。この相互作用の研究は、中性子星内でのハイペロンの出現シナリオを解明する鍵となっています。



図1. 我々が開発しJ-PARCでのハイペロン・陽子散乱実験に用いた円筒型ファイバー検出器(左)と、実験メンバー(右)。



図2. ハイペロンスペクトロメータとその開発メンバー(左)、および、その心臓部(HypTPC)(右)。

(2) **エキゾチックハドロンの研究:** ストレンジクォークを2つ含んだ2粒子系では相互作用が強い引力となり、Hダイバリオンと呼ばれ

る6クォーク状態が形成されると予想されています。大立体角飛跡検出器 HypTPC を用いて H ダイバリオン探索実験を行い、その解析が進んでいます。さらに、この HypTPC を用いた2粒子共鳴の研究から様々なバリオン間、バリオン-中間子間の相互作用や共鳴の性質の解明を目指した実験を進めています(図2)。

(3) **光子ビームによるストレンジネス生成実験:** 本学先端量子ビーム研究センターの 1.3 GeV 電子加速器にて、自ら開発した NKS2 スペクトロメータを用い、終状態相互作用による  $\Lambda$ -中性子間力の測定実験を準備しています。

(4)  **$\Lambda$  ハイパー核  $\gamma$  線精密分光、 $\Xi$  原子 X 線分光:** 我々は自ら開発した大型半導体検出器群を用いて  $\Lambda$  ハイパー核からの  $\gamma$  線を精密に測定し、その詳細なエネルギー構造を次々と明らかにしてきました。現在、この  $\gamma$  線分光の手法を用いて、 $\Lambda$  ハイパー核での荷電対称性の大きな破れの謎の解明を進めています。

(5) **新型半導体センサーの開発:** 米国で計画されている電子-イオン衝突型加速器での実験で用いる、AC-LGAD というセンサーの開発を広島大、信州大、東大と一緒に進めています。

## 2. 短寿命核物理

自然界に安定に存在する原子核(安定核)は陽子と中性子が核力で束縛された有限多体系です。安定核より陽子もしくは中性子を多く含む原子核(陽子・中性子過剰核)は不安定で、有限の寿命で安定な原子核に壊変します。近年、寿命が短い原子核(短寿命核)をビームとして取り出すことが可能になり、このビームを用いた原子核反応実験で安定線から離れた短寿命核の構造の研究や宇宙核物理の研究が行われています。

初期宇宙・超新星爆発・中性子星合体などでは爆発的要素合成(短寿命核が核子等を捕獲する反応)が起こっていますが、多くの反応でそれらの反応率はまだ分かっていません。元素の起源の解明や宇宙リチウム問題等の宇宙核物理の諸問題の解決のために、これらの反応率を原子核反応実験で導出することが求められています。

本研究グループでは原子核実験を通して、

- (1) 宇宙で起こる原子核反応の研究、
  - (2) 元素合成経路上の未知の短寿命核の探索、
  - (3) 短寿命核の構造の研究
- などを行っています。

実験は、理研 RIBF、東大 CNS、原研タンデム加速器施設などで行っています。

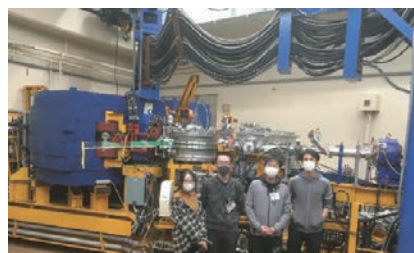


図3. 原研タンデムで行った実験で使用した磁気分析装置 ENMA。

## 3. エキゾチック核の物理

このグループでは、地球上には存在しない中性子過剰・陽子過剰な原子核(エキゾチック核)を自ら生成し、その新しい振る舞いを発見することを主軸としています。こうした研究は宇宙での元素合成の仕組みを理解する鍵となり、星の終焉である超新星爆発や中性子星形成の理解にも繋がります。

特に近年力を入れているのが、中性子のみからなる「原子番号ゼロ」の原子核系(多中性子系)の探索です。中性子間にはクーロン斥力が働かないこともあり、中性子のみから構成される(準)安定構造が存在し得るのではないかと注目を集めています。この研究は開放量子系の物理学という新しい分野にも繋がり非常に面白く、実験・理論の双方から進めてゆくことが求められています。我々の中性子過剰原子核生成技術を最大限に生かして、こうした極限状態の新しい原子核の生成に挑戦しています。

また、こうした探索と並行して、原子核の内部構造に関する実験的研究も進めています。特に、核内で陽子や中性子が塊として局在化する「クラスター構造」の普遍的な発現メカニズムについて、アイソスピン対称性を切り口に解明を目指しています。

これらの実験研究は、東北大 RARiS、理研 RIBF、阪大 RCNP 等を拠点に展開しています。



図4. 理研 RIBF において世界最高感度で実施している多中性子系探索実験の様子。

# 原子核理学グループ

Nuclear Science Group

大西 宏明 教授      柏木 茂 教授

菊永 英寿 准教授      日出 富士雄 准教授

時安 敦史 助教      松村 裕二 助教      宮部 学 助教      横北 卓也 助教

<https://www.raris.tohoku.ac.jp/>      Email: [koho@lns.tohoku.ac.jp](mailto:koho@lns.tohoku.ac.jp)

原子核理学研究グループは、先端量子ビーム科学研究センター三神峯事業所を拠点にして、原子核・ハドロン物理学、加速器科学・ビーム物理学、及び核・放射化学の研究を多角的に進めています。本施設は、3台の電子線形加速器（リナック）と、1.3 GeV 電子シンクロトロン（BST リング）を有する全国共同利用・共同研究拠点（電子光理学研究拠点）であり、東北大学が運営する学内外の研究者のための加速器施設です。これらの加速器から得られる20 MeV~1.3 GeV の特色ある電子線やガンマ線を用いて、上述の分野における最先端研究が推し進められています。原子核理学講座の大学院生は、大型加速器を有する研究環境の中でそれぞれの分野の研究活動に参加します。



1.3 GeV 電子シンクロトロン（BST リング）

## クォーク核物理

クォークから構成される複合粒子であるハドロンは、非摂動的な強い相互作用のもとで、多様な内部構造と相互作用様式を示します。クォーク核物理研究グループでは、センター保有の加速器から供給される高エネルギー光子ビームを用い、 $\eta$  中間子光生成反応の精密測定を通じて、ストレンジネスを顕に含まないペンタクォーク様状態の探索を進めてきました。その結果、従来のハドロン像では説明が困難な共鳴構造の兆候を捉えています。さらに、重水素標

的を用いた実験において、中性  $\pi$  中間子 2 個を終状態とする反応の詳細な解析から、6つのクォークからなる新奇な束縛状態（ダイバリオン）を示唆する実験的証拠を得ました。これらに加え、ハドロン間相互作用の解明を目的とした研究も継続的に推進しています。これら一連の研究を支えるため、反応で生成される多重ガンマ線を高効率で検出する全立体角電磁カロリメータ FOREST（総重量約 5 トン）を整備するとともに、超前方に散乱される核子を捕捉する超前方スペクトロメータ BLC を完成させ、実験基盤の高度化を図っています。



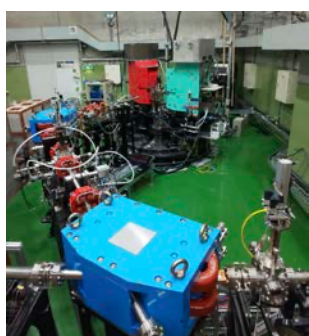
稼働中の 2つの電磁カロリメータ

また、QCD が作り出す真空は、宇宙開闢直後の高温状態や、中性子星内部に存在すると考えられている高密度状態など、多彩な様相を呈しています。我々は、この「QCD 真空」を、それと相互に規定し合う「ハドロン」の性質変化を通じて解明することも重要な研究目標としています。この目的のため、1320本のBGO単結晶から構成される電磁カロリメータ BGOeggを新たに建設し、SPring-8の新ビームラインLEPS2へ移設しました。すでに得られたデータから、身近な高密度状態である原子核内部（ $1\text{ cm}^3$  当たり約 1 億トン）で生成された  $\eta'$  中間子の崩壊を BGOegg により捉え、その性質変化を示唆する徴候を観測することに成功しています。現在は、さらなる測定精度の向上を目指し、ビーム強度の増強および前方カロリメータの建設を進めています。QCD 真空の理解は、物質質量の約 98% を創成するメカニズムの解明へと直結するものです。

## 電子散乱による原子核研究

### 1) 陽子の大きさ（半径）の精密測定

陽子は中性子とともに原子核を構成する基本粒子であり、その大きさや形、内部構造は長年調べられてきました。2010年に陽子電荷半径がもつ深刻な不定性（-4%）が明らかになり「陽子半径問題」と呼ばれる事態になっています。この不定性は、原子核物理学や原子物理学、素粒子物理学に影響するため、陽子半径値決定は喫緊の課題となっています。当センターでは、史上最低エネルギーでの電子散乱から最も信頼度の高い半径値決定を目指し、新ビームラインを含めた測定装置を建設（写真）、2023年度から測定を開始しました。



### 2) 短寿命なエキゾチック原子核の構造

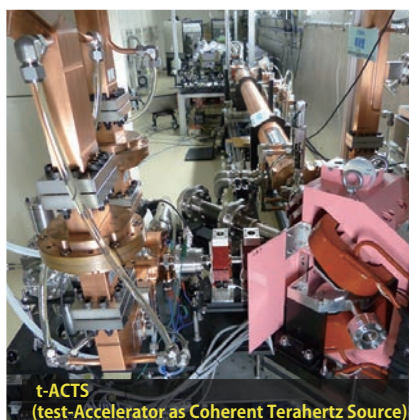
天然には存在しない短寿命不安定原子核に、従来は知られていなかった奇妙な形状や内部構造を持つものが次々と発見されています。不安定核の内部構造解明が宇宙での物質進化（元素合成）の理解に不可欠であることから、世界各地で鎔を削る研究が進んでいます。電子散乱は原子核の内部構造を解き明かす最も優れた方法ですが、短寿命で崩壊する不安定核への電子散乱手法の適用は不可能と考えられていました。我々は、電子散乱による不安定核研究を推進するため、理化学研究所に世界初（現時点では世界唯一）の不安定核専用SCRIT電子散乱施設を建設しました。2022年度にはオンライン生成不安定核を標的とした電子散乱測定を成功し、不安定核の電荷密度分布の決定に着手しました。東北大グループは、散乱電子測定用の大型電磁石スペクトロメータを建設し運用しています。

### 加速器科学・ビーム物理分野

荷電粒子と電磁場あるいは光子との相互作用と集団運動の動力学（ビームダイナミクス）を理解するために、主として高エネルギー電子加速器を用いて研究を行っています。また本

施設の電子リナックやBSTリングの性能向上及び将来の加速器の高度化のための応用研究も行われています。試験加速器（t-ACTS）では、独自に開発した高周波電子銃によって、100フェムト秒以下の超短パルス電子ビームの生成が可能です。この超短パルス電子ビームを使って、発生メカニズムの異なる種々のコヒーレント放射を用いたテラヘルツ光源やビームモニターの開発研究が行われています。現在は共鳴波長よりも短い電子パルスを用いた新奇な自由電子レーザー相互作用の研究を展望して、高周波電子銃に光陰極を導入することによる電子ビームの高輝度化の取り組みも進められています。

また高エネルギー加速器研究機構（KEK）や物質・材料研究機構（NIMS）と連携し、液体ヘリウムを必要としないニオブスズ超伝導高周波空洞の開発研究を進めていて、将来的にはニオブスズ超伝導高周波空洞の技術の汚染水浄化や医療用放射性同位元素製造などのビーム利用・応用への発展も期待されています。



試験加速器 t-ACTS

### 核・放射化学分野

放射性同位元素（RI）を用いた様々な研究を推進しています。先端量子ビーム科学研究センター三神峯事業所の大強度電子リナック（電子・光子照射）をはじめ、本学の大規模サイクロトロン（荷電粒子照射）や核燃料施設（娘核種の分離）を利用して施設の特長を活かした相補的なRI製造を行っています。得られたRIを必要に応じて放射化学的手法により精製し、核壊変特性の研究、光量子放射化分析、元素挙動を知るための化学トレーサー、物質科学研究などに利用しています。その他基礎データとして重要な核反応断面積・収率や線量分布の測定も手掛けています。

# 核放射線物理グループ

Nuclear Radiation Physics Group

伊藤 正俊 教授 寺川 貴樹 教授

足立 智 助教 岩本 ちひろ 助教

<https://www.raris.tohoku.ac.jp/>

Email: itoh@raris.tohoku.ac.jp

**核放射線物理グループ**は、先端量子ビーム科学研究センター青葉山事業所の加速器核物理研究部と応用核物理学研究部の2研究部から構成され、国内有数の大型サイクロトロン(K110MeV) (図1) を用いて原子核物理学や加速器科学及び放射線検出器開発からその医学応用研究まで幅広い研究を行っています。

**加速器核物理学研究部**では、主に3つのテーマについて研究を行っています。一つ目は**宇宙における元素合成過程の解明**の研究です。宇宙に存在する全ての元素は原子核反応により作り出されたと考えられています。この宇宙の元素の組成比を原子核反応率から理解することがこの研究の目的です。現在は元素合成過程の中でも特に重要な**トリプルアルファ反応**と呼ばれる3つのヘリウム原子核(アルファ( $\alpha$ )粒子)から炭素原子核を合成する反応の高温・高密度環境下での反応率を求める研究を行っています。二つ目は、**原子核におけるクラスター構造**の研究です。 $\alpha$ 粒子を原子核の構成要素とする $\alpha$ クラスターに着目し、全ての $\alpha$ クラスターが最低エネルギー軌道に凝縮した **$\alpha$ 凝縮状態**について研究しています。 $\alpha$ 凝縮状態は、 $^{12}\text{C}$ や $^{16}\text{O}$ などの原子核に現れると予測されていますが、実験的には確認されていません。我々はサイク

ロトロンを用いた原子核反応実験により $\alpha$ 凝縮状態を探索しています。3つ目は、原子核物理学や加速器を利用した工学・医学研究のために、サイクロトロンやイオン源の高度化を行っています。近年では、加速器中性子源による革新的医療用RI製造に向けた**大強度負イオン加速システムの開発**を行っています。

**応用核物理学研究部**では、サイクロトロンからの高エネルギー陽子ビームの形を3次元的にイメージングする**3次元ゲル線量計の開発**、陽子ビームとリチウム標的との核反応による**熱外中性子ビーム生成方法の開発**や**熱外中性子エネルギー spektrometerの開発**、さらには工学研究科との共同研究で室温動作可能な高分解能・高検出効率の**臭化タリウム半導体検出器**を開発し、ホウ素中性子補足療法による治療時に発生するガンマ線の計測による治療効果の評価方法の開発など、先進的な医学物理研究を推進しています。

また、核放射線物理グループは、先端量子ビーム科学研究センターのサイクロトロン加速器だけでなく、大阪大学核物理研究センターや理化学研究所仁科加速器科学研究センター等においても加速器を用いて全国的・国際的な共同研究を実施しています。



図1. (中央) 930型サイクロトロン、(左上) サイクロトロン加速電極、(左下) 中性子ビームライン、(右上) 大強度負イオン源、(右下) 重イオン源。

# 加速器科学グループ

Accelerator Science Group

金正 倫計 教授 (客員)

<http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/acceleratorphys/>

当グループは、大強度陽子加速器に関する研究を行います。大強度陽子加速器施設 (J-PARC) は、世界最高強度の陽子ビームを生成し、それをを用いて素粒子・原子核物理、物質科学、生命科学などの広範囲の最先端研究を行うことを目的として原子力研究開発機構 (茨城県東海村) に建設された施設です。

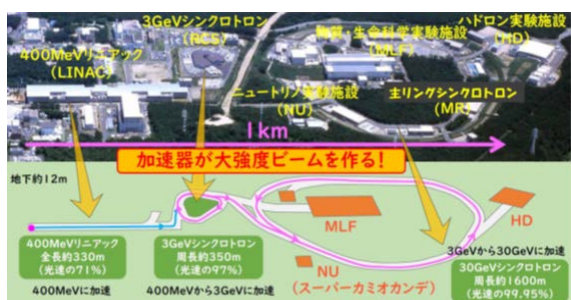


図 1. 大強度陽子加速器施設 (J-PARC)。

J-PARC は、リニアック、速い繰り返しの 3 GeV シンクロトロン (Rapid Cycling Synchrotron, RCS)、50 GeV シンクロトロン (Main Ring, MR) の 3 段の加速器から成ります。現在は、ビーム出力の目標値 (RCS: 1 MW、MR: 1 MW 超) の早期達成、及び安定運転にむけて、イオン源、電磁石、電源、高周波空洞、等の構成機器の技術課題の克服、及びビーム不安定要因の解明、ビーム損失の低減、等、ハード・ソフト両面の研究を進めています。

リニアックと RCS はビーム出力 1MW を既に達成し、現在は安定な長期連続運転に向けた研究を行っています。MR では、電源の増強を完了し、2022 年度からビーム強度と安定性の圧倒的な向上に向けた研究を実施しています。2023 年 12 月には、ビーム出力 760kW での連続運転に成功し、さらなるビーム増強を進めています。

図 2 にリニアック最上流部に設置されている加速空洞 (高周波四重極型リニアック; RFQ と呼びます) の写真と、ビームの質を表すエミッタンスの測定値及び計算値を示します。このビームの質が、後段加速器のビームロスに大

きな影響を与えるため、エミッタンス向上に関する研究がテーマの一つです。

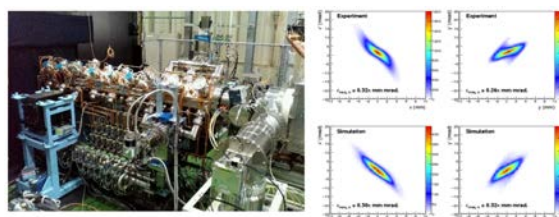


図 2. 高周波四重極型リニアック; RFQ とビームエミッタンスの測定値及び計算値。

図 3 に主リングシンクロトロン (MR) のビーム取り出し部の写真を示します。MR には、ニュートリノ施設、及びハドロン施設へのビーム取り出し部が、それぞれに用意されています。各施設へ特徴のあるビームを取り出します。図 4 にそれぞれの施設へのビーム取り出しパターンを示します。これらのビーム強度を増加させるための研究開発を実施しています。

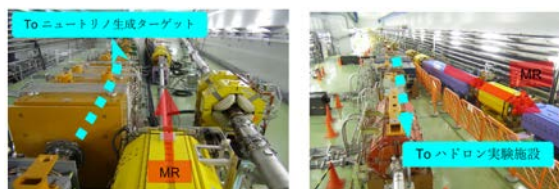


図 3. 主リングシンクロトロン (MR) のビーム取り出し部の写真。

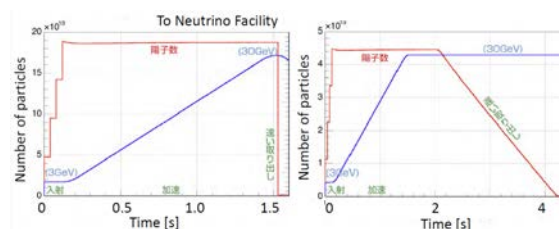


図 4. 主リングシンクロトロン (MR) から取り出されるビームのパターン。左図はニュートリノ施設へのビーム取り出し。3 GeV で入射されたビームが 30 GeV に加速され、一気にニュートリノ施設へ取り出されます (速い取り出し)。右図は、ハドロン施設へのビーム取り出し。3 GeV で入射されたビームが 30 GeV に加速され、長い時間 MR を周回しながら、徐々にハドロン施設へと取り出されます (遅い取り出し)。

# 光電子固体物性グループ

Photoemission Solid-State Physics Group

佐藤 宇史 教授 (AIMR)      菅原 克明 准教授      相馬 清吾 准教授 (AIMR)

中山 耕輔 助教

<https://arpes.phys.tohoku.ac.jp/>      Tel: 022-795-6477

## 1. はじめに

本研究室では、光電子分光法を主な実験手段として、トポロジカル絶縁体、高温超伝導体、グラフェンなどの新機能物質の電子構造とその物性発現機構解明の研究を進めています。これらの電子系で観測される特異な物性（超伝導、金属-絶縁体転移等）は、そのフェルミ準位近傍の微細な電子構造に起因します。角度分解光電子分光（Angle-Resolved PhotoEmission Spectroscopy: ARPES）は、固体のバンド構造を直接観測決定できる強力な実験手段であり、近年目覚ましいエネルギー分解能の向上を達成しました。

## 2. 研究内容

本研究室では、世界最高水準の超高分解能光電子分光装置の建設・改良を行うと同時に、トポロジカル物質や強相関電子系の特異な物性発現機構とその電子構造の関係を明らかにする研究を行っています。現在進めている具体的な研究は、以下のとおりです。

- (1) 新型ナノスピン ARPES 装置の開発と、スピントロニクス関連物質における電子構造の解明
- (2) トポロジカル絶縁体・半金属における電子構造の解明と、エキゾチック準粒子（ディラック・ワイル・マヨラナ粒子）の探索
- (3) グラフェンおよびポストグラフェン原子層薄膜の特異物性発現機構の解明。とりわけ、ディラック電子的振舞の解明
- (4) 鉄系および銅酸化物高温超伝導体の電子構造と超伝導発現機構。とりわけ、超伝導発現の鍵を握るフェルミ準位近傍の準粒子の形成過程と超伝導発現機構の関係
- (5) 空間反転対称性の破れた系におけるスピン軌道相互作用とスピン偏極電子状態
- (6) 分子線エピタキシーによる薄膜作製と、トポロジカル絶縁体・高温超伝導体・原

子層物質のハイブリッド構造における新奇物性創発

さらに、国内外の放射光施設（NanoTerasu, 高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory, 分子科学研究所 UVSOR, SOLEIL（仏）, DIAMOND（英）など）で、放射光を利用した共同利用実験も行っています。



図1. 東北大学に建設した世界最高水準のエネルギー分解能を有する ARPES 装置

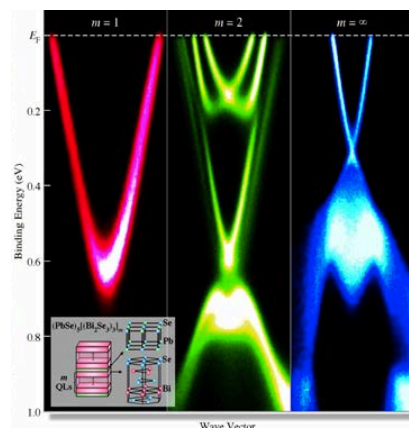


図2. 角度分解光電子分光で決定したトポロジカル絶縁体超構造のバンド分散

# 極低温量子物理グループ

Low Temperature Quantum Physics Group

木村 憲彰 教授

水上 雄太 准教授

<https://www.vlt.phys.tohoku.ac.jp/>

Email: [noriaki.kimura.a6@tohoku.ac.jp](mailto:noriaki.kimura.a6@tohoku.ac.jp)

物質を絶対零度近傍まで冷却すると、熱的な擾乱によって覆い隠されていた物質の本来の性質が見えてきます。とりわけ、多彩な基底状態や量子現象が発現する強相関電子系では極低温であらわになる現象が多く、極低温が物質探索や新現象解明の重要なツールとなっています。本研究グループでは、(i) 結晶構造に特徴をもつ強相関伝導系の物質開発を行い、(ii) これらが極低温・強磁場・高圧などの極限環境で示す新たな基底状態や量子状態を探索し、(iii) そのメカニズムを極低温物性測定を通して明らかにする研究を行っています。

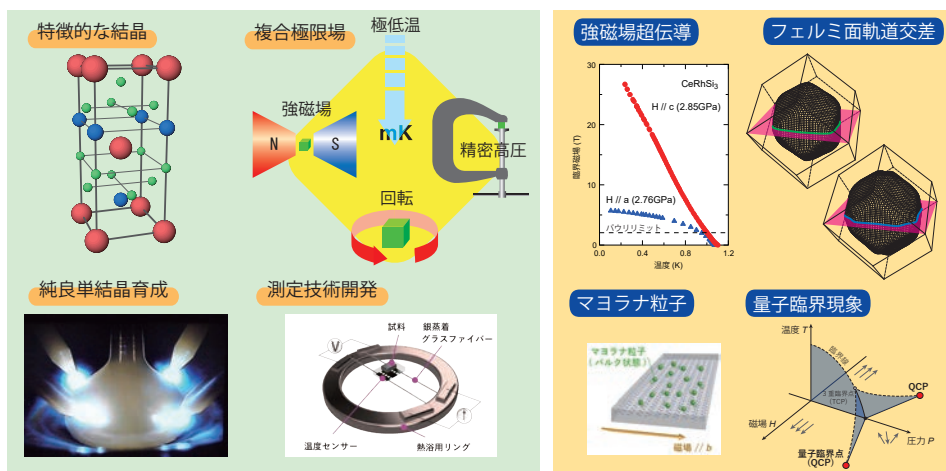
現在本研究グループが取り組んでいる研究テーマは以下のとおりです。

- (1) ドハース・ファンアルフェン (dHvA) 効果で探る強相関電子のフェルミオロジー：量子臨界点近傍であらわれるエキゾチックな量子状態や、パリティの破れに起因したフェルミ面の新しい性質を、dHvA 効果を駆使して明らかにします。
- (2) 空間反転対称性の破れた超伝導：空間反転対称性の破れた結晶構造を持つ超伝導物質を探索し、スピン軌道相互作用によって

発現する新しい超伝導特性を明らかにします。

- (3) トポロジカル量子相：トポロジカル超伝導体やトポロジカル磁性体における非自明な電子状態の解明と新規な物性の開拓を極低温精密測定を通して行います。
- (4) フラストレートした量子スピン系：スピンの非可換性を顕在化させるフラストレーション効果を希土類化合物やスピン軌道モット系において実現し、新たな性質を持つ量子スピン系および準粒子励起の開拓を行います。
- (5) 磁性体の量子臨界現象：強磁性や反強磁性の磁気秩序温度が絶対零度近傍まで落ち込む量子臨界点近傍では、量子的な揺らぎが物性を支配するようになり、予期しない現象が期待されます。私たちはこのような秩序状態の境界に潜む新たな量子状態の探索を行っています。

本研究グループは、これらの研究目的を実施するための純良単結晶の育成と極低温を軸とした世界最先端の実験技術の開発を積極的に進めています。



特徴ある結晶に極低温を軸とした複合環境を組み合わせることによって(左図)、新たな電子物性(右図)を開拓します。

# 巨視的量子物性グループ

Macroscopic Quantum Phenomena Group

大串 研也 教授      今井 良宗 准教授 (高教機構)      堀 文哉 助教

<http://web.tohoku.ac.jp/mqp/>      Email: ohgushi@tohoku.ac.jp

電子が凝集し相互作用する系は、強相関電子系と呼ばれています。強相関電子系では、対称性の破れやトポジカル数で特徴づけられる量子秩序が生じ、巨視的なスケールで量子効果が発現します。超伝導・スピン液体・量子ホール効果は、その代表例です。量子秩序からの素励起・集団励起は、系を構成する電子の個別励起とは全く異なるものになります。新奇な量子秩序を発見すること、素励起・集団励起が担う電子物性を開拓することは、強相関電子系研究の中心課題です。

強相関電子系の舞台としては、有機物質 ( $p$  電子系) から重い電子系物質 ( $f$  電子系) に至るまで様々な物質が知られていますが、我々が対象とするのは遷移金属化合物 ( $d$  電子系) です。その特徴として、1. エネルギースケールが大きいこと、2. 電荷・スピン・軌道・副格子の内部自由度があること、3. 量子位相が内在すること、が挙げられます。これらの特徴により、高温超伝導 (銅酸化物・鉄ニクタイト)、巨大磁気抵抗効果 (マンガン酸化物)、新奇スピン秩序 (イリジウム酸化物・ルテニウムハライド) などの強相関電子物性が発現することが知られています。

遷移金属化合物における強相関電子系の科学を展開・革新する上で鍵となるのが「物質」であることは、歴史を振り返っても明らかです。そこで、研究の柱に「新奇な強相関電子物質の創製」を据えています。様々な固体化学的手法を駆使して、酸化物・カルコゲナイド・ニクタイト・窒化物を含む広範な遷移金属化合物の純良試料を育成しています。また、超高压合成法を用いた新物質探索も行っています。

こうして得たバルク試料に対して、電氣的・磁氣的・熱的・光学的性質を測定することで、強相関電子物性の開拓を進めています。超高压・強磁場などの極限環境下における計測や、放射光などの量子ビームを活用した実験も、積極的に推進しています。こうした物質合成を基盤に据えた総合的研究を通して、強相関電子系における新奇な巨視的量子物性を発見することを目指しています。

現在は、以下のテーマに関する研究を集中的に進めています。

1. ピエゾ磁気効果・非線形伝導などの磁気多極子秩序系における非対角応答の開拓
2. キタエフスピン液体・金属絶縁体転移などのスピン軌道相互作用の卓越した系における量子物性の探求
3. 高压合成法による新物質・新超伝導体探索

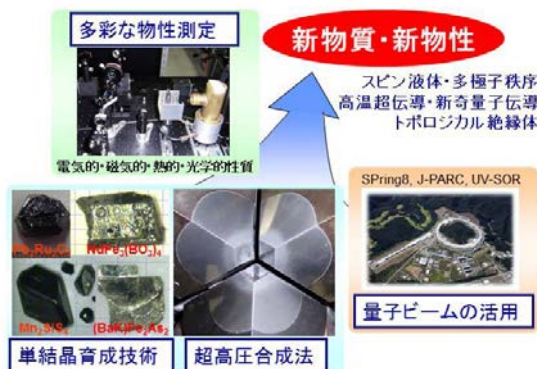


図 1. 研究の概念図。

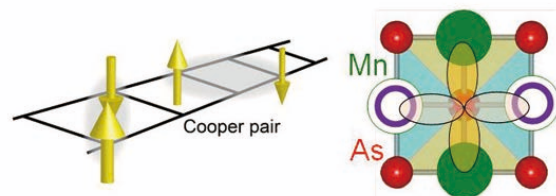


図 2. 梯子格子における超伝導 (左) と磁気四極子秩序 (右)。

# 微視的構造物性グループ

Microscopic Structural Condensed Matter Physics Group

若林 裕助 教授 齋藤 真器名 准教授 原 武史 助教

<https://www.structure.phys.tohoku.ac.jp/> Email: wakabayashi@tohoku.ac.jp

物質の様々な性質は、その構造と結びついています。我々が目指すのは、多彩な物性の起源を、構造を通して微視的に解明する事です。原子間の相互作用までさかのぼって考える事で、観測した微小な構造変化から、物質中で生じている現象を読み解きます。

測定手法は主に図1のような装置による放射光を用いた回折・散乱法で、原理に立ち返った解析によって、通常のX線構造解析を超えた構造研究を行うのが特徴です。これにより、乱れが本質的に重要な系、あるいは結晶格子の周期性が破れた界面での創発物性などに関する研究を進めています。

試料は共同研究者からの供給を受け、我々は測定・解析と、それに基づく解釈に集中することで、様々な物質に対する研究を並行して進めています。具体的な対象としては、(1)  $2p$  電子系 分子性固体、(2)  $3d$  電子系 遷移金属酸化物 (結晶、界面、超薄膜、化学反応場の観察)、(3)  $4f$  電子系 磁性体・価数揺動物質、(4) ガラス・液体のダイナミクス 等が挙げられます。

乱れの観測には、図2のように逆空間に広く広がった散漫散乱を測定・解析します。この例の場合、軌道自由度と結合した Jahn-Teller モードの歪みが観測できており、回折理論に基づく詳細な考察を通して他の手法では計測不可能な軌道自由度の短距離相関を観測しました。



図1. KEK PF BL-4C の四軸回折計。

測定に用いる回折・散乱の理論は確立していますが、計測、解析の実施には様々な障壁があり、光源や検出器の進歩に合わせた高度化が要求されます。回折強度から構造情報を求める逆問題に対し、ベイズ推定の枠組みを用いた表面・界面の構造解析手法の開発 (図3) や、光学系・装置・ソフトウェアの多様な方向からの準弾性散乱手法の高度化も行っています。開発した手法に基づく界面構造の系統的な計測の実現、あるいはガラス・ソフトマター内部の時空間相関計測の限界を広げる事で、構造に基づく物性物理の地平を広げています。

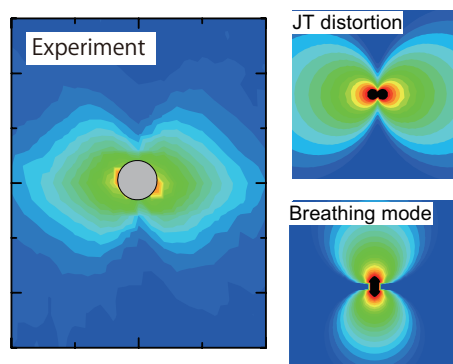


図2.  $\text{Ba}_3\text{CuSb}_2\text{O}_9$  の軌道液体に対応する X 線散漫散乱強度分布。左：実験、右：異なるモードの歪みによるモデル計算強度。

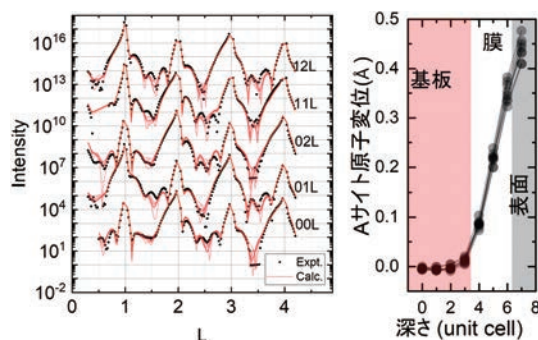


図3. モンテカルロ法による金属酸化物界面構造のベイズ推定の途中経過。(左) 散乱強度、(右) 金属サイトの変位量の深さ依存性。

# 低次元量子物理グループ\*

Low-Dimensional Quantum Physics Group

松井 広志 准教授\*

<http://web.tohoku.ac.jp/ldp/> Email: [hiroshi.matsui.b2@tohoku.ac.jp](mailto:hiroshi.matsui.b2@tohoku.ac.jp)

水素社会の実現には、高性能な燃料電池の開発が欠かせません。そのカギとなる燃料電池電解質は、プロトン伝導体です。材料開発が進められていますが、物性物理学として、プロトン伝導機構は不明です。結晶中のプロトンは、格子系と相互作用するため、フォノンを詳細に調べています。

プロトン伝導体には、水を含む系と、含まない系があります。水を含む系として、親水性ナノチャンネル中の水ナノチューブ、及びタンパク質、多糖類のフィルムがあります。通常廃棄される骨、皮、鱗、甲羅など、生体物質を新たな電気材料として、活用することを目指します。

次世代型燃料電池電解質では、水を含まない系の開発が望まれます。典型的な超プロトン伝導体について、プロトンの伝導・誘電ダイナミクスを研究しています。

プロトンが関わるデバイス開発をプロトニクスと呼びます。生化学、医療、さらに、環境・エネルギー問題とも密接に関連する学際的な研究テーマです。エレクトロニクスに換わるプロトニクスの進展に貢献しています。

現在力を注いでいる課題として、以下の項目があります。

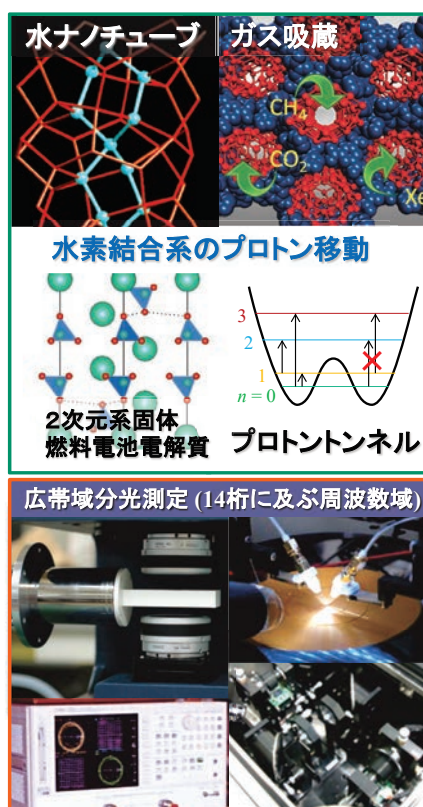
- (1) 超プロトン伝導体 ( $\text{Cs}_3\text{H}(\text{SeO}_4)_2$  など) の超広帯域伝導特性とプロトン輸送機構の解明。
- (2) 水ナノチューブにおける Xe、メタンガス吸蔵の探索、及びプロトン伝導性の抑制効果の研究。
- (3) コラーゲン、及びキチンフィルムの水和状態とプロトン伝導性、さらに燃料電池電解質としての機能性の研究。

上記事項を研究するに当たり、プロトン伝導率、誘電率の周波数分散と温度変化、分子振動、およびプロトンの量子性を測定しています。当グループでは、直流～ラジオ波～マイクロ波～テラ波～赤外にわたる 14 桁の超広帯

域な電磁波を用いています。微小試料の顕微遠赤外分光測定では、高輝度放射光施設 SPring-8 を利用します。これほど広帯域な実験が行えるグループは、世界的にも稀です！また、NIMS の装置を利用して、プロトンの揺らぎをプロトン核磁気共鳴を使って調べています。

こうした電磁波計測は、プロトン、水分子、生体分子、低エネルギー励起などのダイナミクスを捉える強力な手段であり、独創的な研究を展開しています。我々がもつ高周波技術を最大限に活用するため、他大学、他機関の多くの研究者と共同研究を推進しています。

私たちの研究室は、従来型の物性物理学研究の枠を超え、学際的な学問分野の構築を目指しています。さらに、固体物理学実験の基礎を習得し、将来多彩な社会分野に進出できる人材を育てることをモットーにしています。当グループの研究に、学生諸氏が積極的に参加されることをお待ちしております。



# 薄膜界面機能物性グループ

Functional Properties of Thin Film Interface Group

中村 優男 教授      高城 拓也 助教

<http://web.tohoku.ac.jp/film-interface/>

Email: [masao.nakamura.b8@tohoku.ac.jp](mailto:masao.nakamura.b8@tohoku.ac.jp)

異なる物質同士を原子レベルで急峻な界面で接合したヘテロ構造では、低次元化や界面での電荷移動や近接効果などにより、単体の物質とは異なる新しい電子状態が現れます。特に、電子同士が互いに強く相互作用している強相関電子系や、電子の持つ幾何学位相がマクロな物性を支配するトポロジカル物質では、ヘテロ構造化することで、電場や光に対する応答性が格段に向上したり、伝導や光学特性に明瞭な量子効果が発現するといった、基礎物性のみならずデバイス応用上も重要な特性を引き出すことが可能です。

本研究グループでは、分子線エピタキシー (MBE) 法やパルスレーザー堆積 (PLD) 法を用いて量子マテリアルの高品質薄膜・超構造を創成し、ヘテロ界面で発現する新しい物性と機能の探索を行っています。特に、電子構造のトポロジーや量子幾何、電子相関が関与する非自明な量子物性に着目し、基礎物理の理解から将来デバイス機能への展開までを見据えた研究を行っています。また、最先端の薄膜作製・量子物性計測を通して、自ら新しい物理を切り拓く研究者・技術者の育成を目指しています。

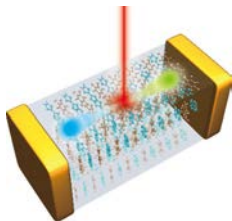
現在取り組んでいる主な研究テーマは以下のとおりです。

- (1) 量子位相を用いた新原理光電変換：波動関数の幾何学効果で生じる光起電力効果 (シフト電流) は、外乱に対する高い堅牢性や高速応答性などの特性を有し、光センサー

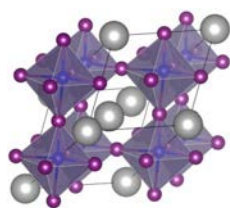
や環境発電素子への応用が期待されています。シフト電流の持つ「エネルギー非散逸性」や「素励起からの直接発生」といった非自明な特性を実証するとともに、高効率化を可能とする新しい材料の開拓を行っています。

- (2) ハライドペロブスカイト量子物性：次世代太陽電池の最有力候補であるハライドペロブスカイトでは、その高い効率に強誘電性やディラック型バンド構造など従来とは異なる量子力学的機構が働いている可能性が指摘されています。MBE 法で作製する高品質薄膜を用いて、すぐれた太陽電池特性の真の起源の解明と、特異な電子構造に基づく新しい量子物性開拓を行っています。
- (3) 界面スピン制御：大きなスピン軌道相互作用を持つハライドは、磁性体を用いずに光によるスピン流の生成や、磁性体との接合によるトポロジカル磁気構造の安定化が可能です。このようなスピン軌道相互作用を利用した界面での新しい磁気応答の観測を目指しています。
- (4) 強相関ヘテロ界面：高温超伝導や巨大磁気抵抗効果など多彩な電子相を示す強相関電子系のヘテロ構造を舞台に、界面で生じる新しい電子相や、電場・光による相制御の実現を目指した研究を行っています。

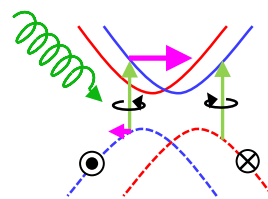
量子位相を用いた  
新原理光電変換



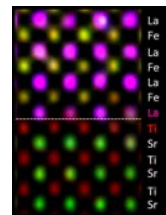
ハライドペロブスカイト  
量子物性



界面スピン制御  
スピン流生成



強相関ヘテロ界面  
電子相制御



# 量子スピン・軌道物性グループ

Quantum Spin-Orbit Condensed Matter Group

大谷 義近 教授 許 明然 助教

Email: yotani@issp.u-tokyo.ac.jp

本研究グループでは、電荷・スピン・軌道・マグノン・フォノンといった多様な角運動量自由度を統合的に扱う「量子スピントロニクス」の創成を目指し、基礎物理から将来の量子技術への応用までを視野に入れた研究を行っています。従来のスピントロニクスが電子スピンの制御を中心として発展してきたのに対し、本研究では軌道角運動量や格子振動、光、スピン波などを含む準粒子の相互作用や相互変換に着目し、新しい量子輸送現象やエネルギー変換機構の解明に取り組んでいます。特に、異なる自由度が強く結合して生じる「キメラ準粒子」の生成・制御・輸送を実現することで、従来にない物性機能の創出を目指しています。

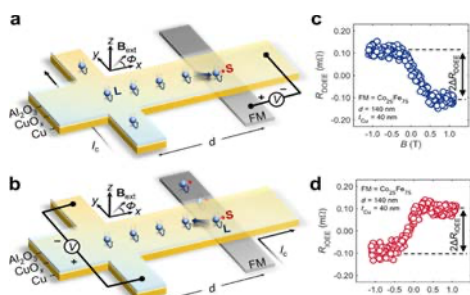


図1. 図(a)(b)は、軌道エデルシュタイン効果の直接過程と逆過程を測定する非局所配置を示しています。電流により生成された軌道角運動量が離れた位置で電圧として検出され、逆変換も観測されます。図(c)(d)はそれぞれの抵抗変化を示し、両者は符号が反対で大きさが等しく、オンサーガの相反関係が確認されます。

研究テーマは大きく三つの柱から構成されます。第一は、電流によって軌道角運動量を生成・制御する軌道流の研究であり、界面や低次元構造における新しい角運動量輸送の仕組みを解明します(図1)。第二は、表面弾性波などを利用した量子輸送の研究であり、単一電子やスピンをコヒーレントに搬送する技術の確立を目指します。第三は、図2に示すようにマグノンとフォノンの強結合によって生じるハイブリッド準粒子の研究であり、人工的に設計した周期構造を用いて新しい波動物性やトポロジカル輸送現象の探索を行います。これらの研究は相互に密接に関連しており、準粒子の生成・変

換・輸送を統合的に制御する新しい物理の体系の構築につながります。

本研究グループの特徴は、材料作製、ナノデバイス加工、精密計測、理論解析までを一体として行う点にあります。

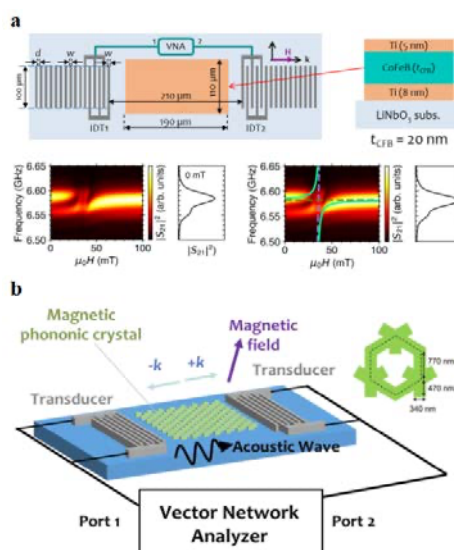


図2. (a) 上図: 磁性体中のスピンの波(マグノン)と、結晶の振動(フォノン)が強く結びついて一体となった「ハイブリッド(キメラ)準粒子」を生成するための表面弾性波デバイスの構造。表面弾性波によって両者の相互作用を制御します。(a) 下図: 表面弾性波の透過率を測定したスペクトル。マグノンとフォノンが強く結合すると、二つのモードが互いに避けるように分裂する「反交差」と呼ばれる特徴的な構造が現れ、ハイブリッド化の証拠となります。(b): ナノスケールの強磁性ハニカム格子を圧電基板上に形成した、マグノンとフォノンの散乱を選択的に調べるためのデバイスの模式図。右上の挿入図は、その基本となる単位胞(繰り返し構造)を示しています。

さらに、JST ASPIRE プロジェクト「人材育成と量子スピントロニクス技術の基盤確立に向けた日仏共同イニシアティブ」の代表を務めており、日仏の主要研究機関との国際共同研究を推進しています。特に国内では、大阪大学や東京大学物性研究所とも密接に連携し、基礎物性の解明からデバイス実証までを一気通貫で進める研究体制を構築していることが大きな強みです。これらの研究は、低消費電力情報処理や次世代量子デバイスなどの基盤技術につながることで期待されています。

# スピン構造物性グループ

Condensed Spin Matter Group

藤田全基 教授 池田陽一 准教授 谷口貴紀 助教

http://qblab.imr.tohoku.ac.jp Email: fujita@tohoku.ac.jp

## 研究のねらい: 量子ビームでみる強相関の世界

電子が単独ではなく集団として振る舞う「強相関電子系」は、現代物性物理の中心課題のひとつであり、電子の性質（電荷・スピン・軌道）が複雑に影響し合い、超伝導や量子磁性（スピン液体など）といった多彩な状態が生まれます。こうした現象のしくみを理解するには、結晶や磁気の「静的な構造」を調べるだけでなく、格子やスピンの時間とともにどうゆらぐか（動的相関）を捉える必要があります。

そこで本研究室では、中性子・放射光・ミュオンなどの量子ビームを用いて、強相関電子系のゆらぎを観測します。また、試料合成から測定・解析までを一体として進め、学生が「物質をつくる・測る・理解する」を一貫して経験できる研究環境を整えています。

## 研究対象

### 1. 超伝導の発現機構

銅酸化物高温超伝導などを対象に、結晶・磁気構造の解明に加えて、さまざまな条件下でのダイナミクス（ゆらぎ）の測定を行います。理論計算との協働も進め、超伝導が生じるしくみの解明を目指します。

### 2. スピントロニクス基盤物質のスピンのゆらぎ

電荷に加えてスピンも利用するデバイスが注目されています。スピン流の生成と散逸に関わるスピンのゆらぎを、量子ビームを用いて微視的に理解することを目指します。

### 3. 従来の枠組みを超える相転移・相変態

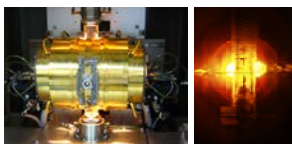
これまでの理論的枠組みや観測手法だけでは捉えきれない相転移や相変態に焦点を当て、量子ビーム実験と物性測定を組み合わせる研究を進めています。重い電子系・希土類磁性体における量子磁性や、金属材料に現れる短距離秩序などを対象に、状態変化の起源に迫ります。

## 本研究室の特徴

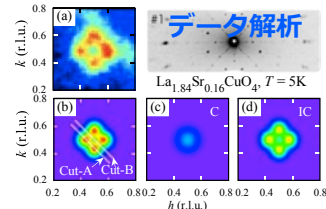
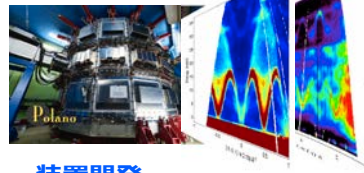
本研究室の特徴は、試料合成から物性測定までを一体として進められる点です。組成や作製条件、合成手法を工夫し、研究の目的に合った試料を用意することで、物性の本質に迫る手がかりを得ます。加えて物性物理の理解には、見たい現象（スピンや格子など）に応じて量子ビームを使い分けることが重要です。本研究室では研究対象に応じて、中性子・放射光 X 線・ミュオンなどを活用します。実験は国内の大型施設に加え、必要に応じて海外施設でも行います。また、国内最大級の中性子物性科学研究所として、JRR-3 と J-PARC で 4 台の中性子実験装置を運営しています。複数の装置を活用できる環境は世界的にも珍しく、学生も実験計画から測定・解析まで経験できます。

本研究室は国内外から多くの大学院生を受け入れてきました。学生主体の歓迎会や追いコンに加え、共同研究者・OG・OB との交流行事など、親睦を深める機会も設けています。

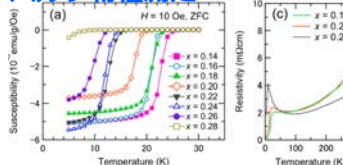
### 物質合成・新奇物質探索



### 量子ビーム実験



### バルク物性測定



### 装置開発



# 強磁場物性グループ\*

High Magnetic Field Condensed Matter Physics Group

野尻 浩之 教授\*     Chanhyeon Lee 助教     David Gracia Alcalde 助教

<http://www.hfpm.imr.tohoku.ac.jp>

Email: [hiroyuki.nojiri.e8@tohoku.ac.jp](mailto:hiroyuki.nojiri.e8@tohoku.ac.jp) /     Tel: 022-215-2017

強磁場物性グループは、電子のもつ磁石—スピンがもたらす量子現象の研究を行っています。

- 物質制御の有力な手段—強磁場

磁場はスピンや電荷の運動と直接結合する外場です。通常では存在しない極限環境=強磁場の下では、物質は人間の予想を越える新しい性質を示します。当グループは、このような強磁場極限環境の下であられる物質の新しい姿を極めることを目指しており、様々な磁場誘起相転移現象を研究しています。

- 研究テーマは主に3つに分かれます

- 1. 強磁場量子ビーム実験

X線自由電子レーザー、放射光や中性子と強磁場を組み合わせ、量子効果による磁場誘起相転移を研究します。50テスラに至る世界最高の強磁場下で、高温超伝導体における電荷の秩序化やグラファイトなどの低次元導体の量子極限状態の電子相転移を調べ、強い電子相関をもつ物質の相転移の機構を明らかにし、強磁場でしか見られない物質の新しい状態を探求します。また、強磁場を利用した光と物質の相互作用、未

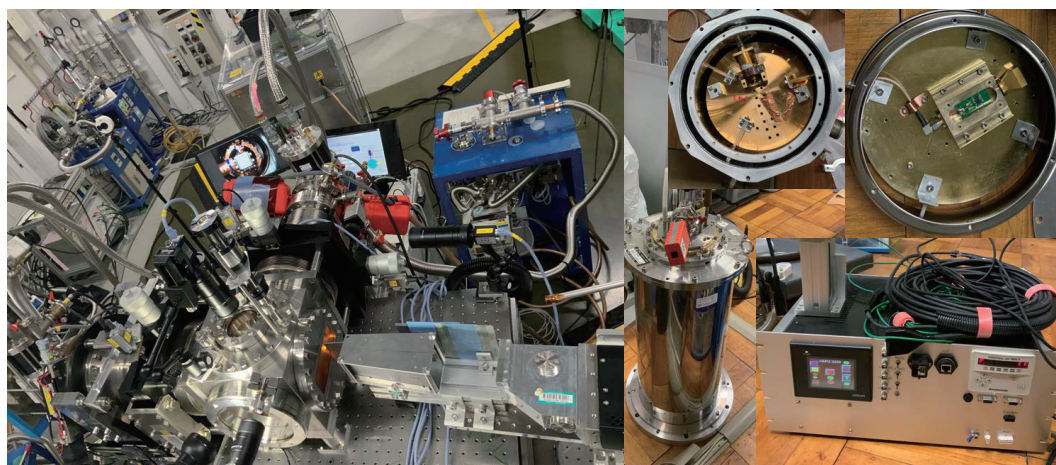
知粒子の探索などの共同研究も推進しています。

- 2. ナノトポロジーや対称性がもたらす新しい量子磁性、磁気誘電現象

スピннаノチューブやスピン多面体などのナノスケールの新しい構造（トポロジー）をもつ物質群において、スピンの右左;カイラリティによる量子磁性を研究します。バルクの古典的な磁石ではあらわれない量子現象を極め、量子ゆらぎがもたらす新しい状態や多彩な相図などを明らかにしてゆきます。対称性の破れがもたらす磁気と電気の結合—マルチフェロ現象の研究のために、テラヘルツ波や強磁場中性子回折などの手法を駆使して研究を行います。

- 3. 量子伝導

金属、半導体などの性質は動き回る電子がもたらします。強磁場を加えることで、電子の運動や閉じ込めを制御し、空間や時間の反転対称性の破れ、物質中の相対論効果などがもたらす量子伝導を研究します。これらの量子伝導では、スピンの状態とも絡み合って、新しい超伝導状態などが出現します。これらを通して強磁場がもたらす多様な電子伝導の物理を探究します。



# 低温物質科学グループ

Low Temperature Materials Science Group

野島 勉 准教授 中村 慎太郎 助教

<http://ltsd.imr.tohoku.ac.jp/>

Email: [t.nojima@tohoku.ac.jp](mailto:t.nojima@tohoku.ac.jp) Tel: 022-215-2167

本グループでは、低温において顕著にその特性が現れる超伝導体や強い相関を持った電子系における電子物性の研究を行っています。これらの物質が低温で示す物理現象を解明するだけでなく、電子状態を能動的に制御しながら新しい物理現象を見出すことを最終的な目標としています。この目標を達成するため、薄膜、多層膜、単結晶およびそれらをデバイス化した試料を用い、低温（数 10 mK - 300 K）・磁場中（0 - 14 T）での輸送特性や熱力学特性を調べています。

最近では、電場誘起超伝導、薄膜超伝導、磁場中新規超伝導をキーワードとした研究を主に進めています。

## ● 進行中の研究テーマ

### (1) 電場を用いた超伝導制御と新超伝導探索

電気二重層トランジスタ構造により発生させた超強電場を用いて、超伝導体薄膜や絶縁体結晶表面に、高密度の伝導キャリアを注入し、そこで創生される特殊条件下での超伝導を調べています。特に、強電場が生み出す空間反転対称性の破れた超伝導現象や超伝導と他秩序

（磁性・誘電性）の共存状態に注目しています。

### (2) 薄膜を用いた 2 次元超伝導物性

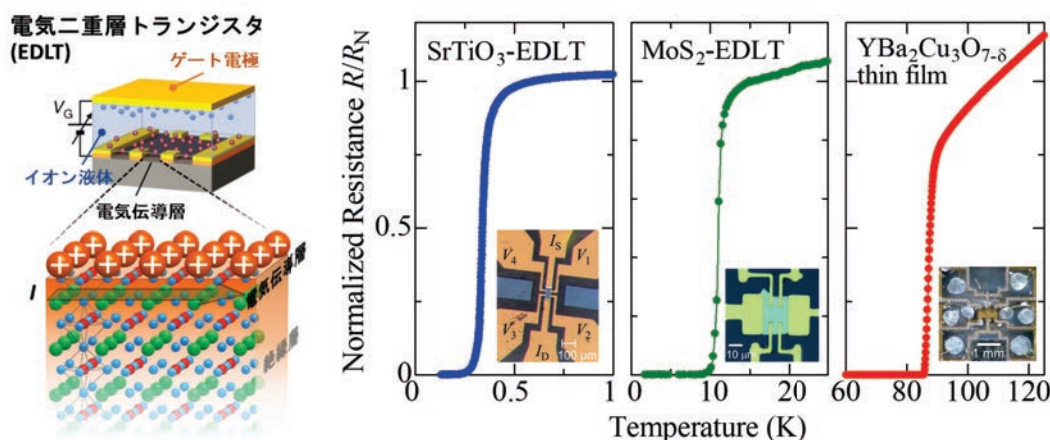
超伝導体を数 nm から数十 nm の薄膜にすると、次元性の低下により新たな特性が現れたり、バルク（3 次元的な固体）で顕著でなかった現象がより鮮明になったりします。様々な種類の超伝導体の薄膜を用いて、超伝導転移温度・転移磁場の上昇や新規超伝導現象の創出を目指した研究を行っています。

### (3) 超伝導体の渦糸物理学

銅酸化物、鉄ニクタイト・鉄カルコゲナイドといった高温超伝導体や薄膜超伝導体では、大きな熱・量子ゆらぎの効果により、従来型の超伝導体には顕著にされなかった渦糸状態（磁場中での量子磁束状態）や量子臨界性が観測されます。磁化や磁気抵抗測定により、その特性解明を行っています。

## ● 役に立つ実験装置開発

極低温下で物性測定を可能にする実験装置の開発も行っています。装置開発の経験は物理現象を広く理解する上でも大いに役立ちます。



電気二重層トランジスタデバイスの概念図（左）と様々なデバイス試料の超伝導転移（右）

# 分子物性物理グループ

Condensed Matter Physics in Molecular Materials Group

佐々木 孝彦 教授 杉浦 栞理 助教 古川 哲也 助教

<http://cond-phys.imr.tohoku.ac.jp>

Email: [takahiko.sasaki.d3@tohoku.ac.jp](mailto:takahiko.sasaki.d3@tohoku.ac.jp) Tel: 022-215-2025

本グループでは、分子性有機物質の強相関電子物性に関する実験的研究を進めています。有機分子で構成されている分子性有機物質の特徴は、構造的な“やわらかさ”と豊富な“パイ電子系自由度”が協調した物性が現れることです。さらに、この“やわらかさ”と密接に関係して、超伝導から絶縁体までの多彩な電子状態が現れます。私たちは、分子性有機物質の多様な個性と物理現象の統一性を融和させた新しい物質科学の創生を目標にして、電子物性物理の重要で興味ある課題にチャレンジしています。

## ○ 分子性有機物質の精密電子相制御

強相関電子系の物性研究における最も重要な課題のひとつが金属-絶縁体転移に関する問題です。その中でも、モット絶縁体転移と電荷秩序絶縁体転移は、特に中心的な課題です。有機物質系は特徴的な柔らかい格子を有するために、圧力の印加や分子の置換によるバンド幅の精密制御、冷却速度やエックス線照射などによるコントロールされた乱れの導入が可能であるため、多彩な物性の外部制御が可能です。私たちはエックス線照射による分子欠陥の系統的な導入手法を開発し、分子性強相関電子系における乱れによるアンダーソン転移とモット転移の協力・競合関係や超伝導に与える影響を実験的に明らかにする研究を行なっています。

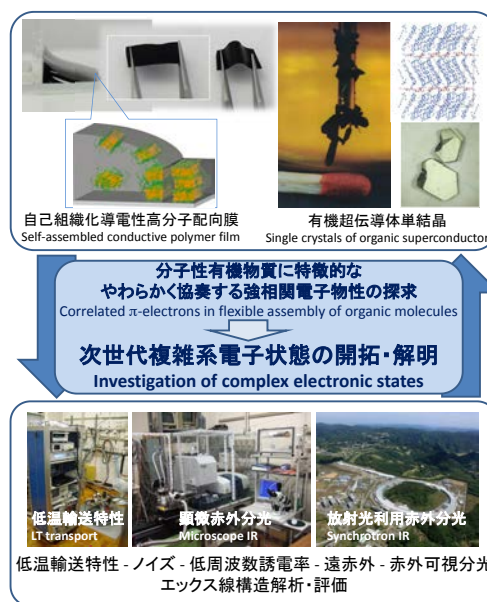
## ○ マルチスケールエネルギーランドスケープ描像が創出する新しいパイ電子物性

分子性物質が有する電子状態の特徴の一つは、比較的大きく広がった分子軌道と電子相関が働いた電荷-スピン分布のために、電荷とスピン、また分子と格子が緩やかに結合した複合的な自由度や多様な秩序が現れることです。特に $\kappa$ 型や $\theta$ 型と呼ばれる分子配列を持つBEDT-TTF系分子性有機物質では2次元の分子配列上の電荷分布に特徴的な自由度があり、直流電気伝導などの静的状態では絶縁体のよ

うな振る舞いをして、光のような振動する電場に対しては集団的なダイナミクスを示すようになります。また競合/拮抗した電子自由度がもたらすエネルギーランドスケープ描像に基づいた電荷ガラス状態の出現など電荷-スピン-格子結合と複合的な電子自由度に起因する新しい電子状態を探索する研究を行っています。

## ○ 導電性有機高分子の構造-電気伝導相関解明に基づく高電気伝導化

導電性高分子は、軽量で柔らかく、可視光を透過させやすい特性から次世代のフレキシブルエレクトロニクス応用に重要な材料です。一方で、構造の複雑さからミクロな物性物理学的視点からの研究が進んでいません。私たちは、更なる高電気伝導化への指針を得るべく、特徴的な高次階層構造に着目した成膜手法の開発、放射光を利用した構造解析、低温輸送特性測定の研究サイクルによる電子状態解明を進めています。



研究概念図の説明 分子性有機物質結晶、導電性有機高分子膜の作製と物性測定実験の研究サイクルによる強相関パイ電子系の電子状態解明

# トポロジカル物質創成グループ

Topological Materials Exploration Group

酒井 英明 教授      川又 雅広 助教

Email: hideaki.sakai@tohoku.ac.jp      Tel: 022-215-2022

トポロジーの概念はもともと数学に由来しますが、近年では物性物理学においても重要な役割を果たしています。固体中で電子の波動関数が、相対論的な効果や強い相互作用によって「ねじれた」形をとると、メビウスの輪のような非自明なトポロジーを持つことがあります。このようなトポロジカル物質では、ディラック粒子やマヨラナ粒子と同じ運動方程式に従う電子状態が現れ、外乱に強く安定した伝導や応答を示すため、エレクトロニクスや量子技術への応用が期待されています。

本グループでは、合金から酸化物に至る幅広いトポロジカル物質を対象に、溶融法、気相法、高圧法など多彩な合成手法を使って新物質や高品質結晶を創り出し、その未知の物性や機能を探索します。また、強磁場・低温・高圧といった極限環境や、収束イオンビームによる微細加工を駆使した先端的な輸送測定も自ら行い、合成と測定の両輪で新しいトポロジー物性物理を解明することを目指します。このように設計・合成・測定を一貫して行うことで、個性的な物質から普遍的な物理を紡ぎ出す研究を展開しています。



図1. トポロジカル量子物質の設計と創成

## 1) 量子多体现象 × ディラック電子

相対論的ディラック方程式に従う固体中の伝導キャリア（ディラック電子）が、磁性・強誘

電性・多極子秩序・重い電子系・高温超伝導等と絡み合う物質の開拓を進めています。スピンや電気分極を利用した伝導・状態制御に加え、ディラック電子の超高易動度を活用することにより、これまで検出が困難であった新奇量子多体现象の実験的解明と応答の巨大化を目指しています。

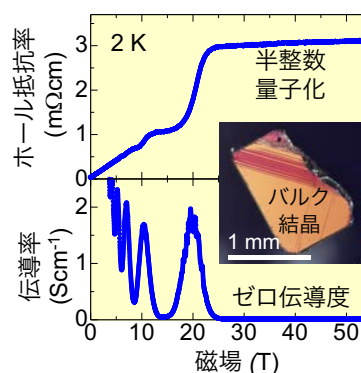


図2. ディラック磁性体でのバルク量子ホール効果

## 2) 磁性体 × 非自明トポロジー

磁性体中のスピンの渦状・らせん状に秩序すると、実空間において非自明なトポロジーが生まれます。また、スピン秩序はシンプルでも、それらを取り囲む電子軌道や原子配位により対称性が破れると、運動量空間でもトポロジカルなバンド構造が実現します。このようなトポロジカル磁性体を対象に、巨大ホール効果や新奇整流効果などの創発を目指し、理論研究者とも連携した物質探索を行っています。

## 3) 環境発電 × ディラック電子

超高易動度ディラック電子は、温度差による発電のベースとなる熱電効果や熱磁気効果においても卓越した性能を示します。バンド構造やキャリア濃度を精密制御することで、従来材料を超える熱電応答の実現を目指しています。

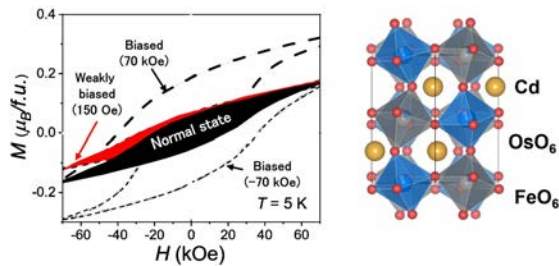
# 強相関電子物理学グループ

Strongly Correlated Electron Physics Group

山浦 一成 教授 (客員)<sup>1</sup> 石井 賢司 教授 (委嘱)<sup>2</sup> 徳永 陽 教授 (客員)<sup>3</sup>

Email: <sup>1</sup>YAMAURA.Kazunari@nims.go.jp <sup>2</sup>ishii.kenji@qst.go.jp <sup>3</sup>tokunaga.yo@jaea.go.jp

**山浦一成**：磁性材料・スピントロニクス材料の創製と物性解明を通じて、次世代スピンドバイスの基盤技術創出を目指しています。人工界面に依存しないバルク材料に着目し、近年は  $\text{Cd}_2\text{FeOsO}_6$  をはじめとする二重ペロブスカイト酸化物を対象に、磁気交換バイアス効果の開拓を進めています。室温近傍での動作が期待される材料系の実現により、スピナルデバイスの高性能化と低コスト化への貢献が期待されます。高温高压合成装置による試料作製、放射光施設 SPring-8 (BL02B2) での高分解能 X 線回折測定、第一原理計算を組み合わせて構造と物性の相関を解析し、国際共同研究も活用しつつ、情報通信技術の発展に貢献することを目指しています。



二重ペロブスカイト酸化物における磁気交換バイアス効果と結晶構造。

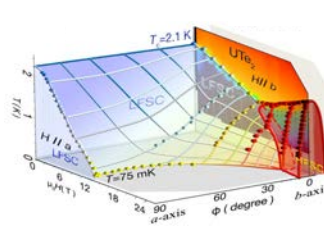
**石井賢司**：東北大学キャンパス内にある NanoTerasu や兵庫県西播磨にある SPring-8 といった世界最先端の放射光施設から得られる強力な X 線を利用した強相関電子系の研究を行っています。遷移金属化合物などの強相関電子系では電子の持つ電荷・スピン・軌道と結晶の格子が複雑に絡み合うことで物性が発現しており、従来の方法では得られない知見を与えることができる放射光 X 線を利用した先端的計測は、その絡み合いを解きほぐす上で極めて有効です。例えば、先端的計測の一つである X 線非弾性散乱では、電荷・スピン・軌道や格子振動の励起状態を観測し、それらのダイナミクスを支配する相互作用を明らかにすることができます。このような放射光を利用した計測法を発展させて強

相関電子系における物性の発現機構解明に取り組むことに加え、そこで得られた知見をエネルギー・環境問題解決に資する材料の電子状態分析に活用することで社会に貢献することを目指しています。



SPring-8 に設置した X 線非弾性散乱装置。

**徳永陽**：1911 年に超伝導が発見されて以来、銅酸化物、有機物、鉄系など様々な超伝導体が見つかり、その性質の多様性が明らかになってきました。特に 2000 年以降、ウラン化合物において「スピン三重項超伝導」と呼ばれる新しいタイプの超伝導体が発見され、その特異な性質が注目されています。例えば、強磁性と超伝導がマイクロに共存したり、通常は磁場で壊れる超伝導が逆に磁場で強化されるなど、従来の常識を覆す現象が観測されています。また、スピン三重項超伝導はトポロジカル超伝導体として次世代量子コンピュータへの応用も期待されています。私たちの研究グループでは、核磁気共鳴法をはじめ、単結晶育成、磁気・輸送測定、中性子散乱などの多角的な手法を駆使し、最新の単結晶微細加工技術も活用しながら、新奇な強相関電子物性の解明に取り組んでいます。



スピン三重項超伝導体 ( $\text{UTe}_2$ ) の特異な磁場中相図と核磁気共鳴実験装置。

# 生命非平衡物理グループ

Physics of Living and Nonequilibrium Systems Group

鳥谷部 祥一 教授\*    佐久間 由香 准教授    中山 洋平 助教    西澤 賢治 特任助教

<http://neq.phys.tohoku.ac.jp/>

生命系などの非平衡かつ柔らかい系の性質を、物理の言葉で記述し理解することを目指しています。特に、非平衡熱力学、情報熱力学、ソフトマター物理学などの理論をよりどころに、生体分子、細胞膜、細胞運動などの生命系から、微小粒子を用いた物理系まで、幅広い系を対象に実験研究を進めています。現在は以下のようなトピックについて研究を進めています。新しいテーマを常に開拓しています。

## 1) ゆらぐ系での非平衡熱力学と情報熱力学

細胞内では、「生体分子機械」と呼ばれるナノマシンが自律的に運動して重要な役割を担っています。その運動の背後にある物理を、非平衡、ゆらぎ、情報といったキーワードを軸に、1分子実験技術を駆使して研究しています。特に、生命現象の理解には「情報」の概念が重要と考え、「情報熱力学」の基本概念の実証から、その生命系への応用まで、幅広く研究を展開しています。さらに、これらの知識を統合し、自律的に運動する人工分子機械の創出にも挑戦しています。

## 2) アクティブマターの物理

バクテリアは、外界の情報を処理して遊泳を制御し、栄養源などへ向かって進む「走性」を示すなど、高度な自律制御を実現しています。私たちは、このマイクロな自律系の振る舞いを、物理の言葉で記述し理解することを目指しています。特に、集団で遊泳する際に現れる多様で豊かな現象を「アクティブマター」の物理として探求しています。

## 3) 生命の起源 / 遺伝子工学 (情報複製の物理、遺伝情報の起源、膜複製など)

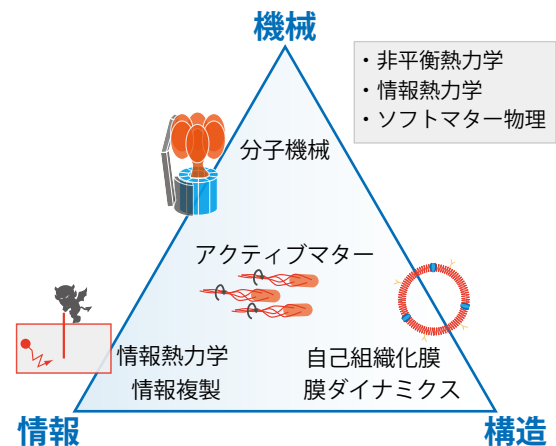
無生物系から生命系へと転移するいわゆる「生命の起源」は、物理の問題としても豊かな内容を含んでいます。特に、遺伝情報や自己複製

する膜の起源は、非平衡熱力学やソフトマター物理学の重要な対象です。これらを、モデル実験系等を通して実験物理として探求しています。また、その知識を応用することで、バイオ工学技術の発展を目指しています。

## 4) 細胞膜の物性と生命機能

細胞膜は生命機能発現の場としての役割を担っており、特に膜弾性や膜流動性などの力学的特性は、生命機能を支える重要な物理量です。私たちは、非平衡状態にある生細胞膜と平衡状態にある非生細胞膜の力学的特性を比較することで「生きていることに特徴的な物理量」を抽出し、物理の観点から生命の理解を目指しています。さらにその知見を正常細胞と病変細胞の膜の物理量の差に展開し、医学への応用の可能性についても探っています。

これらの研究は、国内外の多様な分野の研究グループとの共同で進めており、グローバルな研究環境で生命と物理をつなげる物理法則の解明を目指しています。



機械、情報、構造という観点で生命現象の理解を目指しています。

# 超高速分光グループ

Ultrafast Spectroscopy Group

岩井 伸一郎 教授 川上 洋平 准教授 天野 辰也 助教

http://femto.phys.tohoku.ac.jp/ Email: s-iwai@tohoku.ac.jp

旧約聖書によれば光は天地創造の初日から存在しますが、この四半世紀の間に起こった光のイノベーションはかつてないほど劇的です。超短パルスレーザー、光周波数コム、アト秒干渉計、テラヘルツ光など最先端フォトニクスは、物質中の電子をアト秒精度で自在に操作する、超高速エレクトロニクス、スピントロニクスを可能にします。こうした現在の光科学は、基礎学理としては量子多体系の非平衡現象への挑戦でもあります。

本研究グループでは、光による電気伝導性や磁性の制御（光誘起相転移）やアト秒電子ダイナミクスなどの光強電場効果の研究によって、現在のエレクトロニクスやスピントロニクスの動作速度（ギガ（十億）ヘルツ）を千倍から百万倍凌駕する超高速（テラ（1兆）ヘルツ～ペタ（千兆）ヘルツ）フォトニクスを目指します。有機超伝導体、高温超伝導体、量子スピン液体/マヨラナフェルミオン物質や、強相関ディラック半金属など、量子多体効果が生み出す「強相関電子」の世界を舞台に、世界最先端のアト秒（アト秒=百京分の一（ $10^{-18}$ ）秒）光技術を駆使して、電子の空間・時間反転対称性を操作し、次々世代の極限光エレクトロニクス・スピントロニクスを開拓します。

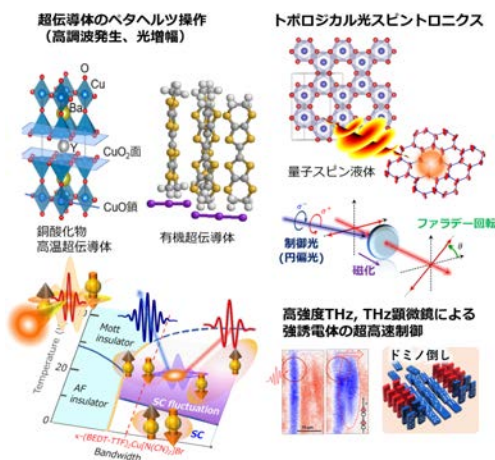


図1. 量子多体物質における光強電場効果とアト秒光機能の開拓。

(1) 強相関電子系における光誘起相転移の探索：有機、銅酸化物超伝導体、ハニカム格子の量子スピン液体、スピン軌道相互作用の大きなディラック半金属、電子間相互作用による空間反転対称性の破れを示す電子強誘電体など、超高速光機能性が期待される物質を対象に、光誘起相転移（光による電子的、磁氣的性質の巨視的な変化）の探索を行います。

(2) 単一サイクル位相制御光の発生と極限分光：短パルス化の極限には何があるのか？光の電場振動が一周期に満たない極限光パルス（< 5 フェムト秒）を開発し、「光電場が電子を駆動する」世界を究極のアト秒時間精度でのぞきます。強相関電子系のフロケ（光と電子の強結合）状態や高次高調波発生を探索します。

(3) 広帯域、高強度の THz 光を用いた強相関電子系の電子状態の解明と制御：テラヘルツ（THz）領域のポンププローブ分光やテラヘルツ波発生イメージングによって、電子状態やドメイン構造を明らかにします。金属とは？絶縁体とは？低エネルギー電子状態から物質の基本的な姿を再考します。また、高強度 THz 光を励起光として量子多体物質の操作を行います。

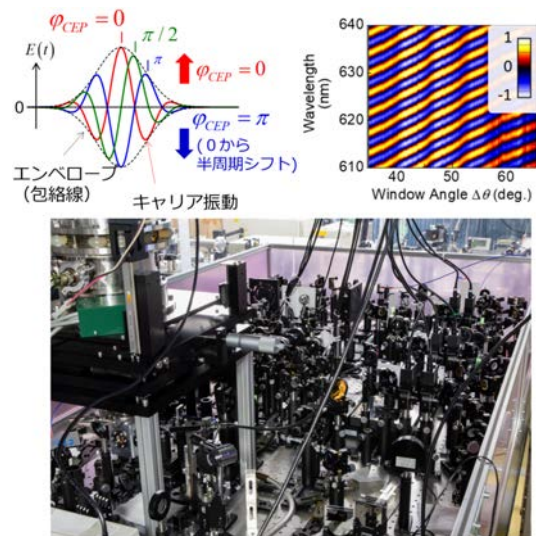


図2. 光電場のキャリアエンベロープ位相制御極（上）と短パルス光源を用いた超高時間分解測定装置（下）。

# 量子ダイナミクスグループ

Quantum Dynamics Group

遊佐 剛 教授 橋本 克之 助教 Nicholas Moore 助教

<http://quantum.phys.tohoku.ac.jp>

現代社会の毎日の生活を支えている半導体産業は、超高品質な結晶作成技術やデバイス技術など多くのハイテク技術で成り立っています。私たちはこのよう先端技術に裏打ちされた超高純度半導体デバイスや新奇材料を舞台とし、電子やホール、励起子、核スピンなどが量子力学によって織りなす物理を研究していますが、このような理想的な舞台を用いた研究は、物性物理だけでなく基礎物理の面でも意義があります。最近では、ビックバンのような宇宙創成の初期段階で現れるプランクスケールの宇宙である「量子宇宙」やブラックホールの検証を行うための玩具模型を、半導体チップ上で実現する研究に最近特に力を入れており、素粒子、宇宙論、量子情報、物性理論や材料系といった幅広い研究者の方々と共同研究を通じて、新しい物理を探索していこうと考えています。

## ★ 実験研究で探る量子宇宙/量子情報

トポロジカル物質の代表例である量子ホール状態は、絶縁体であるバルクが伝導体であるエッジに守られた構造をもっています。この量子ホールエッジは有効理論的には時間1+空間1=2次元の共形場理論(CFT)で記述できます。共形場理論はAdS/CFTに代表されるように、量子力学と重力の両方が重要となる系でも登場します。そのため、量子ホールエッジは量子宇宙やブラックホール、ワームホールを擬した実験系として最適な系と考え、現在研究室のメインの研究テーマとなっています。また、最近では分数量子ホール状態のバルクの励起を重力子 (graviton) と関連付けて論じた報告もあり、物性実験から宇宙論を研究する可能性が高まってきました。

最近、量子情報や量子計算が話題となっていますが、私たちは主に量子宇宙に関して場の理論的(連続状態)な量子情報に興味を持っており、量子ゆらぎの測定や量子エネルギーテレポーテーションの実験検証を目指した研究

も行っています。

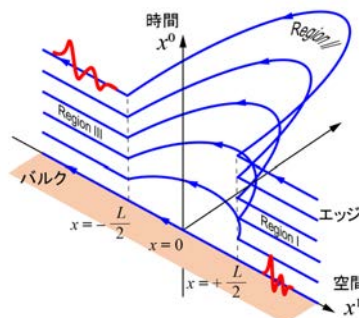


図1. 量子ホールエッジの2次元時空図。エッジは平坦な時空から曲がった時空を伝搬し、引き延ばされた後、平坦な時空に出力される。

★ その他 分数量子ホール状態は、ボーズ凝縮や超伝導、超流動といったマクロな量子現象の一つであるだけでなく、エニオンと呼ばれるボゾンでもフェルミオンでもない特異な系で、トポロジカル量子計算への利用が模索されるなどの観点からも興味深い系です。また、極低温強磁場環境の光学測定や超高速分光イメージングなどの世界にない独自技術を使って、国内外の研究グループと共同で新奇材料に関する研究も行っています。

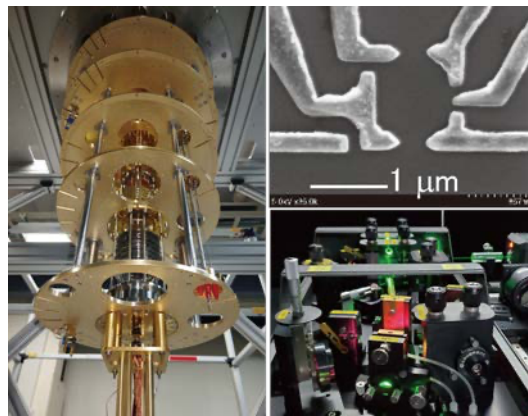


図2. (左) 最低温度5ミリケルビンを実現し、強磁場を発生することのできる装置の内部。(右上) 半導体デバイスの一例。(右下) 光学測定系の一例。

# 量子光学グループ

Quantum Optics Group

金田 文寛 教授 富田 知志 准教授 (高教機構)

大野 誠吾 助教 Soyoung Baek 助教 Pengfei Wang 助教

<https://web.tohoku.ac.jp/sspp/>

光の量子である光子は、黒体輻射や光電効果などを通じて、人類が量子の世界を認識、理解するための重要な概念でありました。現在、光子は基礎物理での重要性のみならず、従来の計算機では困難な計算問題の高速計算、安全な情報通信、高分解能光計測などに応用できる可能性が示唆されており、大きく注目されています。光子は常温で安定であり、速く「飛ぶ」ため、量子の基礎研究や、情報担体として遠くへ量子情報を伝送する上で有利な量子です。本グループでは、光子やそれを取り巻く量子現象と、それを用いた高度な量子技術の実験研究を進めています。

## 1) 量子もつれ光子の発生、操作、測定

光子のみならず、量子を探究する上で大きな課題は、ひとつひとつの量子を独立かつ自在に扱うための考え方や技術が未熟であり、確率的にしか動作しない場合が多いことです。我々は、光子の数やその量子もつれの発生、操作、測定の物理を明らかにしていきながら、それらの高効率化と高精度化に挑戦しています。現在は、量子もつれを発生や消去する非線形光学効果、全光学的な光子の任意保持と取り出しを実行する量子メモリ、線形光学回路と量子測定によ

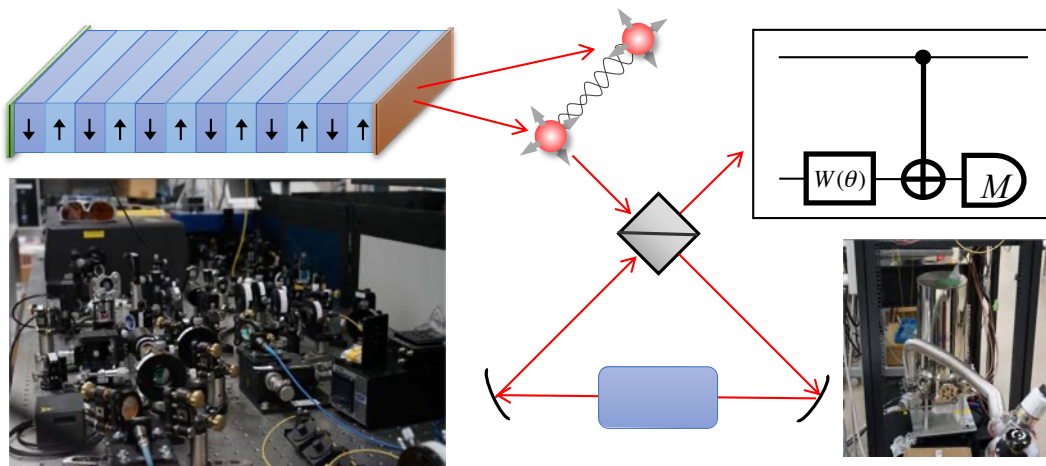
る量子状態制御、超伝導光子検出器等を研究しています。決定論的に量子もつれ光子を扱う技術を実現することが目標です。

## 2) 光子の量子計測

量子のある物理量を正確に測定しようとすると、別の物理量の不確定性が大きくなってしまふことがあります。一方で、量子もつれにある複数の光子は、互いに遠隔地にあっても、量子状態に強い相関をもち、特定の計測において古典的計測の限界(標準量子限界)を越えた高分解能計測が可能です。量子の測定がどのように最適化されるのかを明らかにすることは、物理学と計測技術の両面で重要な課題です。我々は、偏光、周波数、空間、光子数における量子もつれ光子や量子干渉計等を駆使した量子計測モデルを実験室に実現することで、量子による計測の限界を探っています。

## 3) メタマテリアルフォトンクス

金属、半導体、磁性体などを用いた時空間変調メタマテリアルを創成しています。光物性や電子物性の知見を駆使し、マイクロ波、テラヘルツ光、可視光などの光を創る・操ることを目指して、基礎原理から応用展開まで幅広く研究しています。



# スピン機能物質科学グループ

Spin-Related Functional Materials Science Group

小野瀬 佳文 教授 増田 英俊 講師 Chong Chen 助教

Email: yoshinori.onose.b4@tohoku.ac.jp Tel: 022-215-2040

スピン磁気モーメントが整列している磁性体はいろいろな応用がなされています。特に、スピンの平行に整列している強磁性体は工業用磁石や磁気メモリなどで広く活用されています。近年の研究によって明らかになったことは、スピンの特別な配列を示したり、結晶構造が特別な対称性を有していたりすると、より非自明な現象や高度な機能を発現する場合があります。

例えば、図1に示すようなスピンが面内で回転するようならせん磁気構造を有している場合には電気双極子が整列した強誘電体となります。このような磁性誘起の強誘電体は、その強い電気と磁気の結合により新奇な電磁気応答や光学応答を示します。

また、図2に示したようなスピンの渦状に配列したスキルミオンでは、トポロジーの効果により電子が実効的な磁場を感じ自発的なホール効果を起こします。本グループでは、このように磁性体における特殊な磁気構造や結晶構造によって生み出される機能や、そのような機能を発現する物質を調べています。

## ● 進行中の研究テーマ

### (1) 空間反転対称性が破れた磁性体におけるマグノンの非相反性

空間反転対称性とは、原子位置  $\mathbf{r}$  に  $\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}$  といった変換を行ったときに元の結晶と異なるかどうかを表す対称性です。磁性体において空間反転対称性が破れているとジャロシンスキー守谷相互作用と呼ばれる相互作用が働き、様々な現象が発現します。その一つがマグノンの非相反性です。

マグノンというのは磁性体における磁気モーメントの量子のことで、空間反転対称性が破れると進む方向の正負で異なる周波数や速度を有することになります。このような性質を非相反性といいます。本グループでは、このような空間反転対称性が破れた磁性体におけるマグノンの非相反性の研究を行っています。

### (2) マルチフェロイクスにおける表面弾性波

表面弾性波とは、文字通り表面を伝搬する弾性波のことです。圧電体の上にくし型の電極を付けるとマイクロ波によって表面弾性波を発生させることができますが、それを応用すると携帯電話などに入っているマイクロ波のバンドパスフィルタになります。このような表面弾性波デバイスでは、通常は非磁性の圧電体基板を使いますが、それを上で述べたマルチフェロイクスでおきかえると、表面弾性波の非相反性や巨大磁場変化など従来にない外場制御性が発現します。本グループでは、このようなマルチフェロイクス表面弾性波デバイスの新機能を開拓しています。

### (3) マグノン、フォノンの熱ホール効果

電子が磁場中でローレンツ力を受けて曲がることによって電流と垂直方向に電場が生じる現象をホール効果と言います。電荷をもたないフォノンやマグノンといった粒子においては、ローレンツ力が働かないため通常はホール効果は起きません。しかしながら、トポロジカルな効果が働くとこれらの粒子でもホール効果が起きます。本研究グループではこのような非自明なホール効果を熱流を用いて調べています。

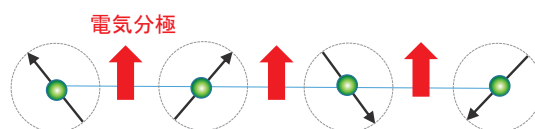


図1. 強誘電性を示す、らせん磁気構造。

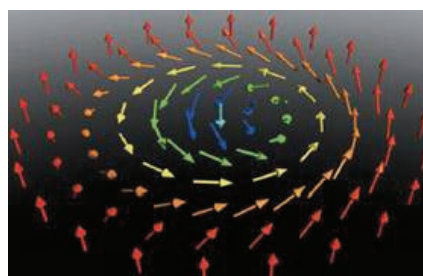


図2. トポロジカル磁気構造体スキルミオン。

# 結晶成長物理グループ

Crystal Growth Physics Group

藤原 航三 教授    野澤 純 准教授    荘 履中 助教    住吉 壺心 助教

<http://www.xtalphys.imr.tohoku.ac.jp/>    E-mail: [kozo.fujiwara.c6@tohoku.ac.jp](mailto:kozo.fujiwara.c6@tohoku.ac.jp)

結晶成長物理グループでは、液相（融液・溶液）から固相（結晶）が形成される過程で生じる様々な現象を研究対象としています。半導体、金属合金、化合物などの実用バルク材料の多くは液相からの結晶成長により作製されています。

これらの結晶材料の融点は 1000 °C を超えるような高温であり、結晶成長過程において固液界面でどのようなメカニズムで結晶が成長し、結晶材料の組織がどのようなメカニズムで形成されていくのか、といった結晶成長の本質はほとんど理解されていません。結晶成長メカニズムを基礎的に解明し、これをベースに新規な結晶成長技術を開発し、高品質結晶材料を実現することを目指しています。

## 研究課題

結晶成長メカニズムの基礎研究にとどまらず、実用的に価値のある結晶成長技術の開発や新物質の創製を行っています。

- 半導体材料の固液界面ダイナミクス
- 太陽電池用 Si インゴットの成長技術開発
- コロイド系による結晶化メカニズムの解明
- 金属合金系の融液成長メカニズム

## 高融点材料の固液界面のその場観察

融液からバルク結晶が成長する際、固液界面における原子の挙動により、成長速度や結晶組織に違いが生じます。Si のような高融点

(1414°C) 材料の固液界面で何が起きているかを解明するためには、固液界面を直接観察することが最も有効な手段です。

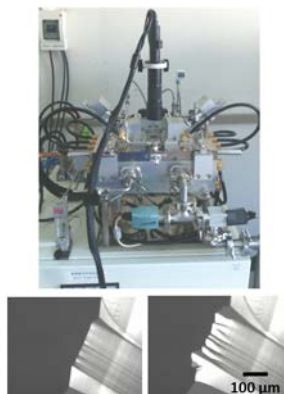
本グループでは、独自に“その場”観察装置を開発し、Si の融液成長メカニズムの解明と制御に関する研究を展開しています。本技術は、半導体材料だけでなく、各種化合物材料や金属材料など高融点材料の固液界面の観察にも適用できるため、融液成長の総合理解を目指して研究を発展させていきます。

## 太陽電池用 Si 多結晶インゴットの成長技術開発

結晶成長の研究では、実際に社会に役立つ結晶の開発も重要な課題です。クリーンなエネルギー源として期待されている太陽光発電において、エネルギー変換効率を向上させるためには高品質結晶の実現が不可欠です。本研究グループでは、結晶成長の基礎研究で得られた知見を大型結晶の成長技術に反映させ、独自の結晶成長技術の開発を行っています。研究成果を社会に還元するべく、太陽電池に関連する様々な企業や研究機関と協力して真剣に技術開発に取り組んでいます。

## コロイド結晶成長メカニズムの解明

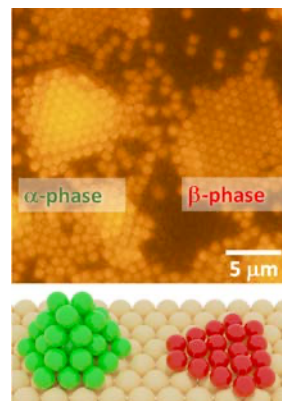
コロイド粒子の規則構造化機構の解明は結晶成長の理解に直結します。その場観察を軸にメカニズム解明を進めています。



その場観察装置と Si の固液界面



キャスト成長装置と Si 多結晶インゴット



多形転移が関与するコロイド結晶化

# 表面構造物性グループ

Surface Structure Physics Group

虻川 匡司 教授    山本 孟 准教授

<http://surfphys.tagen.tohoku.ac.jp/>

Email: abukawa@tohoku.ac.jp    Tel: 022-217-5364

表面の関わる分野は多岐にわたりますが、原子レベルでの理解は進んでおらず未だにフロンティアです。特に結晶の表面は原子の配列が突然途切れ結晶の対称性が破れる場であり、特有の組成や構造が現れることが知られています。本グループでは、新しい物質や2次元物質を創成し、表面数原子層に敏感な電子回折法、走査トンネル電子顕微鏡、光電子分光および光電子顕微鏡法を使用して、その表面構造と電子状態を原子レベルで解明する研究を進めています。

## 独自表面構造解析法の開発

表面の原子配列を3次元的に可視化できる独自の表面構造解析法の開発を行っています。開発したワイゼンベルグ反射高速電子回折法(W-RHEED)は、広い3次元逆格子空間を短時間で測定でき、表面構造を3次元的に決定できる独自開発の手法です。この手法を使って未知の表面構造の決定を行っています。

## NanoTerasuを使用した表面電子状態研究

放射光施設 NanoTerasu では、輝度の高い細く絞られた X 線が利用可能です。その質の高い X 線を用いてこれまで計測が難しかった不均一な物質表面をナノレベルで観測します。また、触媒や電池などを動作環境下で計測できる技術「オペランド計測技術」の開発を進め、不均一な実試料を反応環境下に置いた状態での計測を可能にし、機能発現機構の解明を目指します。

## 極端環境での物質探索と電子状態の理解

表面研究でも用いられる分光学的な手法を活用することで、超高压などの極端環境で得られる新奇物質結晶の電子状態に関する研究も進めています。電子状態を解明することで、これらの物質が示す磁性や電子物性の起源を明らかにします。例えば最近では、遷移金属化

合物において価電子間の強い相関によって形成される一種のクラスター状態を、放射光 X 線を用いて詳しく解明しようとしています。特別な測定手法と合成手法を組み合わせることで、未知の物理現象の発見を目指します。

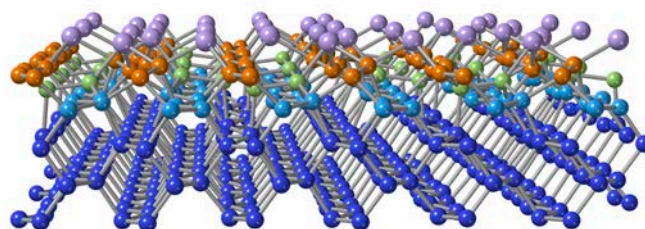
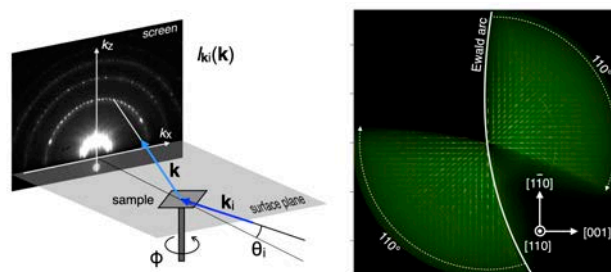


図 1. W-RHEED により決定した Si(110)3x2-Bi 表面構造。

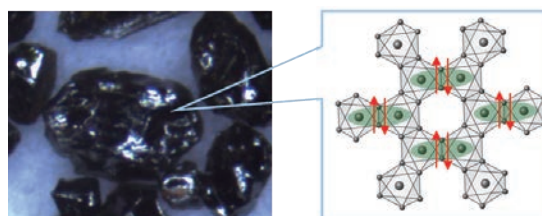


図 2. 超高压条件下で得られたバナジウム化合物の単結晶と、その結晶中に現れる新奇な電子状態。

# スピン量子物性グループ

Quantum Spin Physics Group

佐藤 卓 教授    那波 和宏 准教授    金城 克樹 助教

[http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/sato\\_tj/](http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/sato_tj/)

E-mail: [taku@tohoku.ac.jp](mailto:taku@tohoku.ac.jp)    Tel: 022-217-5348

電子の持つスピン  $1/2$  は大変魅力的な研究対象です。多くの物質では低温で電子スピンは秩序化しますが、中には幾何学的フラストレーションや低次元性の効果、さらには他の自由度との結合等により特異な揺らぎを伴う基底状態を示す場合があります。我々は中性子非弾性散乱というスピンの運動を直接観測できる強力な手段を用いて、このような揺らぎに支配された量子的な基底状態の形成原因やそこから現れる特異な物性を解明する事を目的に研究を進めています。

中性子散乱では固体物理研究に適したエネルギー領域（大凡  $0.01-1000$  meV）に関して、スピン揺動の空間的な情報を含む運動の詳細を観測する事ができます。パルス中性子施設 J-PARC では、広い運動量・エネルギー空間の散乱関数を測定可能です。一方、我々が分光器を有する原子炉中性子源 JRR-3 では特定の運動量・エネルギーの情報を精密に測定することが可能です。

本研究室では、スピンドYNAMICS 測定に対する唯一無二の手段である中性子非弾性散乱を駆使して以下のような研究を行っています。

- ・ 遍歴電子系における反強磁性と超伝導の研究
- ・ 低次元フラストレート量子スピン系における巨視的量子現象の研究
- ・ 磁性体におけるトポジカルスピントクスチャーの形成とそのスロダイナミクスの研究
- ・ 非周期スピン系における磁気秩序とダイナミクスの研究
- ・ 中性子非弾性散乱分光器の開発
- ・ 中性子非弾性散乱スペクトル解析法の開発

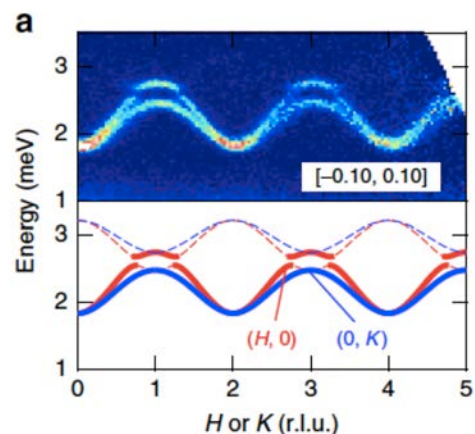
本研究室の特色としては、一人一人の学生が試料作成から中性子データ解析までを一貫して行うことにあります。このため、研究対象とする物理現象への深い理解が得られると期

待されます。

また、中性子散乱実験の成功には良質の試料や基礎物性データが欠かせません。この目的のため研究室には試料作成装置やマクロ物性測定装置等も整備されています。

最近の研究例として、量子反強磁性スピンダイマー系  $\text{Ba}_2\text{CuSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$  におけるトポジカルなトリプル励起の測定結果を図に示します。トリプルとは非磁性シングレット基底状態からの第一励起状態（トリプル）が磁性体中を伝搬することで生じる素励起（準粒子）です。

我々は  $\text{Ba}_2\text{CuSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$  のトリプル分散を中性子非弾性散乱を用いて精密に測定しました。この結果、トリプル分散中にギャップ形成が明瞭に観測されました。詳細な解析の結果ギャップ上下のトリプル波動関数が異なるトポロジーで特徴づけられること、このためギャップ内エネルギーを持つサンプルエッジ状態が形成されること等が判明しました。これらの結果はスピン系中のボーズ準粒子におけるトポジカルな性質な発見として大きな興味を持たれます。



$\text{Ba}_2\text{CuSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$  におけるトリプル分散関係の測定結果。J-PARC/MLF に設置された AM-ATERAS 分光器で測定。K. Nawa *et al.*, Nature Communications 10, 2096 (2019).

# 電子線ナノ物理グループ\*

Electron-Crystallography and -Spectroscopy Group

虻川 匡司 教授 (兼任)      佐藤 庸平 准教授      松本 高利 助教

<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/terauchi/html/index-j.html>

Email: tadashi.abukawa.e1@tohoku.ac.jp      Tel: 022-217-5374

量子サイズ効果、軌道整列効果などが支配する量子ドット、ナノチューブ、GMR ナノクリスタルなどの物性解明には、従来のマクロスケールの物性解析手法ではなくナノメートル (1 nm = 10<sup>-9</sup>m) スケールでの物性解析手法が必要不可欠です。これは電子ナノビームを用いることによって可能となります。電子ナノビームを使うと 1) 物質を 100 万倍以上に拡大して原子を直接視ることができます。2) 回折パターンから、物質のシンメトリーをはじめとする逆空間の情報が得られます。3) エネルギー分析によって数 meV~1000 eV という広いエネルギー領域にわたる物質の素励起 (フェルミ準位近傍から内殻準位の電子励起まで) を調べることができます。このような実空間、逆空間、エネルギー空間に関する情報が得られる電子ナノビームをプローブとして使うと、物性物理の興味ある多くの問題を解明することができます。

本研究室では、興味ある物質の局所構造・局所電子状態を明らかにするため、

- ・電子エネルギー損失分光 (EELS) 法による光学物性の解明・伝導帯状態密度分布の解明、
- ・軟 X 線発光分光 (SXES) 法による価電子帯状態密度分布の解明、

を行っています。これらの測定手法の精度向上のための装置・解析手法の開発と、その物性物理学への応用を行い、多くの成果を上げてきました。

現在、次のようなテーマについて研究を行っています。

1. クラスタ物質やナノネットワーク物質 (ナノチューブ, フラレン, ボロン化合物など) の構造・電子状態
2. 近赤外光散乱ナノ微粒子の光学物性
3. 運動量分解 EELS によるプラズモン振動の運動量依存性

4. 角度分解軟 X 線発光分光法を用いた異方性材料の電子軌道の空間分布解析

5. 軟 X 線発光分光の自己吸収効果を用いた価電子帯・伝導帯の同時解析

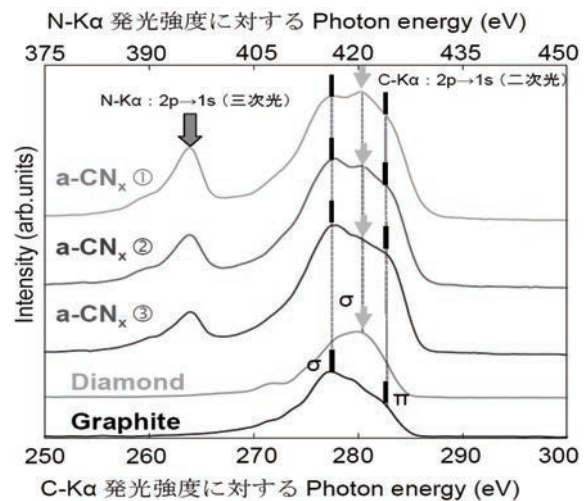


Fig.1: 軟 X 線発光分光によるアモルファス窒化カーボン a-CN<sub>x</sub> の電子状態。

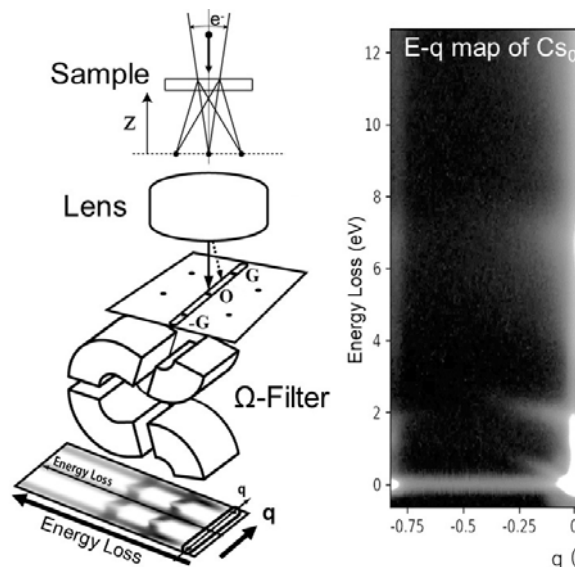


Fig.2: 角度分解 EELS を用いて測定した Cs ドープ酸化タングステンの E-q マップ。

# 結晶構造物性グループ\*

Structural Physics and Crystal Physics Group

佐藤 卓 教授 (兼任)      山本 孟 准教授

<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/kimura/>      Tel: 022-217-5352

結晶は原子が規則的に並んだものですが、相転移（例えば黒鉛がダイヤモンドになる等）が起こると原子や電子の分布は何らかの事情で変化します。それがたとえ僅か  $0.1 \text{ \AA}$  以下の変化であっても結晶の性質（誘電性、伝導性、磁性など）が大きく変わることがしばしば起こります。このような原子や電子の変位を X 線や中性子線などを用いた回折実験で「観る」ことにより、結晶の世界の法則を明らかにしていきます。

実験は高温から極低温、あるいは高磁場下・高圧下など様々な条件で行います。こういうといかにも日常とは全く無縁なことと思えるかもしれませんが、皆さんが日頃使うテレビ・パソコンなどの中のコンデンサ、半導体など様々な工業材料の物性を理解する事や、ロボットのアクチュエータ、フラッシュメモリの材料、超伝導などの未来の物質の探索、更には地震機構の解明などとも繋がっています。結晶中の原子や電子の分布を知ることは全ての領域の基礎です。なぜなら、どの結晶でもその中には膨大な数の原子や電子が互いに影響を及ぼし合っていて、それらの相互作用が物質全体の性質を決めているからです。

実験では色々な装置を利用します。実験室には世界的にも極めてユニークな X 線回折装置があり、現在も様々な新しい装置を開発しています。更に、高輝度放射光施設 SPring-8 や Photon Factory の X 線回折装置、日本原子力研究開発機構・東海 3 号炉や大強度陽子加速器施設 J-PARC の中性子回折・散乱装置を利用した、最先端の実験及び装置開発も行っています。

・ 研究室の主要研究テーマ

1. 放射光施設 (SPring-8, Photon Factory)、中性子施設 (JRR-3M, J-PARC)、実験室での実験手法・新しい装置の開発。
2. 多重極端条件下 (高圧、高電場、高磁場、極低温) における精密構造解析手法の開発。
3. 超精密結晶・磁気構造解析による固体物質の電子密度分布と核密度分布の可視化。
4. X 線・中性子・ミュオン量子ビームの高度相補利用による強誘電体、磁性体、マルチフェロイクス等の構造物性研究。
5. 超高压合成法による物質合成と量子ビーム実験を用いた結晶および磁気構造の解明。

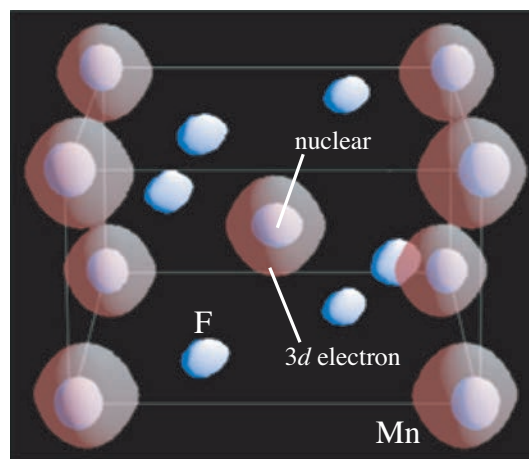


図 1. 単結晶を用いた精密結晶・磁気構造解析により得られた反強磁性体  $\text{MnF}_2$  の原子核密度分布 (青丸) と  $\text{Mn}^{2+}$  スピン密度分布 (赤丸)。赤丸は、 $3d$  軌道を占有している電子スピンの空間分布を表している。

# 量子機能計測グループ

Quantum Measurement and Functional Sensing Group

大谷 知行 教授 (客員)<sup>1</sup> 藪野 正裕 准教授 (客員)<sup>2</sup>

<sup>1</sup><https://thzimg.riken.jp> Email: otani@riken.jp, chiko.otani.c4@tohoku.ac.jp

<sup>2</sup><https://www2.nict.go.jp/super/staff.html> Email: masahiro.yabuno@nict.go.jp

世界最先端の研究データは、しばしば最先端の計測分析技術や機器を通じて生まれ、その実験技術は日々著しく進化し続けています。これらの計測分析技術の物理的振る舞いを理解し、能動的に活用することにより、物理学のみならず異分野融合を切り拓く新たな計測・分析手法が生まれます。量子機能計測グループでは、最先端の計測分析技術を基軸として、超伝導体を用いた量子検出器の開発や新たな電磁波領域であるテラヘルツ波を用いたセンシングに関する研究を進めています。

1つめの研究テーマは、赤外線と電波の中間に位置するミリ波・テラヘルツ電磁波 (周波数 0.1–30 THz) 領域における量子計測とセンシング・イメージングに関する研究です。テラヘルツ帯は、電磁波の光と波の性質が融合して現れる帯域で、ソフトマテリアルに対する物質透過性や特徴的な吸収スペクトル構造を示すとともに、近未来の超高速無線通信 (Beyond 5G/6G) のキャリアとしても期待されています。本テーマでは、テラヘルツ波を用いたセンシング・イメージング、テラヘルツ波照射による生細胞内のたんぱく質の構造・機能のアクティブ制御、ミリ波・テラヘルツ波の高感度検出のための超伝導マイクロ波力学インダクタンス検出器 (MKIDs) の研究開発、及び、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の偏光観測のための GroundBIRD 実験 (図 1) に関する研究を行っています。この研究は、理化学研究所仙台支所 (仙台市青葉区) または和光本所 (埼玉県和光市) にて進められます。

2つ目の研究テーマは、紫外から中赤外波長領域における超伝導単一光子検出器の研究です。量子情報の担い手である光子を高効率に検出する単一光子検出器は、量子コンピュータや量子通信技術に不可欠な重要デバイスです。特に超伝導現象を利用した検出器は、従来技術を凌駕する性能から、量子情報社会を築く基盤技術になると期待されています。本テーマ

では、厚さ 10 nm 程度の超伝導薄膜ストリップを用いた超伝導ストリップ光子検出器 (SSPD) を開発します。デバイス設計からクリーンルーム施設での作製、極低温技術を用いた測定まで一貫して行うと共に、国内外の研究チームと共同して量子コンピュータ、リモートセンシング、バイオイメージング等の先端技術分野への応用を進めます。この研究は、情報通信研究機構未来 ICT 研究所 (兵庫県神戸市) にて進められます。

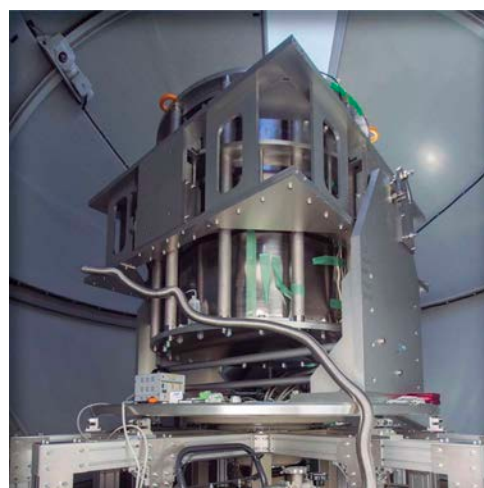


図 1. スペイン・カナリア諸島に設置した宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測実験のための GroundBIRD 望遠鏡。

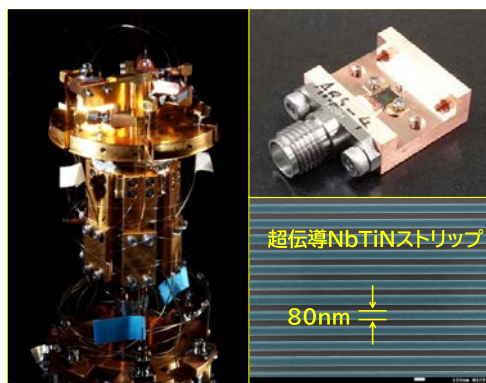


図 2. (左) 冷凍機システムの内部。(右上) パッケージに実装した SSPD 素子。(右下) 超伝導ストリップの SEM 画像。

## 東北大学物理学教室の沿革

- 1907 東北帝国大学の分科大学（理科大学）として創立。
- 1911 仙台中心部の片平地区で数学科、化学科とともに開設。
- 1919 理学部となる。
- 1945 第2次世界大戦末の仙台大空襲で建物の大部分が焼失する。
- 1949 新制東北大学の理学部となる。
- 1953 大学院の理学研究科が設置されたのに伴い、物理学専攻を設置。
- 1957 原子核理学専攻を設置。
- 1964 物理学第二学科を設置。
- 1968 物理学第二専攻を設置。
- 1969 片平地区から青葉山地区への移転整備がスタート（1979年に完成）。
- 1993 教養部が廃止され、大学4年間の一貫教育となる。
- 1994 大学院への重点化により3専攻が物理学専攻へ改組・統合。
- 2002 新移転整備がスタート（2003年に完成）。
- 2003 21世紀COEプログラム（物理学分野）で拠点形成開始。
- 2004 国立大学法人東北大学に移行。
- 2008 グローバルCOEプログラム（物理学分野）が開始。
- 2015 理学研究科合同C棟が完成。
- 2015 スピントロニクス国際共同大学院プログラム（GP-Spin）が開始。
- 2017 宇宙創成物理学国際共同大学院プログラム（GP-PU）が開始。
- 2019 材料科学国際共同大学院プログラム（GP-MS）が開始。

理学研究科合同棟



2003年に完成した合同A棟および合同B棟と、2015年に完成した合同C棟からなる。大学院講義室、物理学専攻図書室、研究室、実験室などが含まれる。

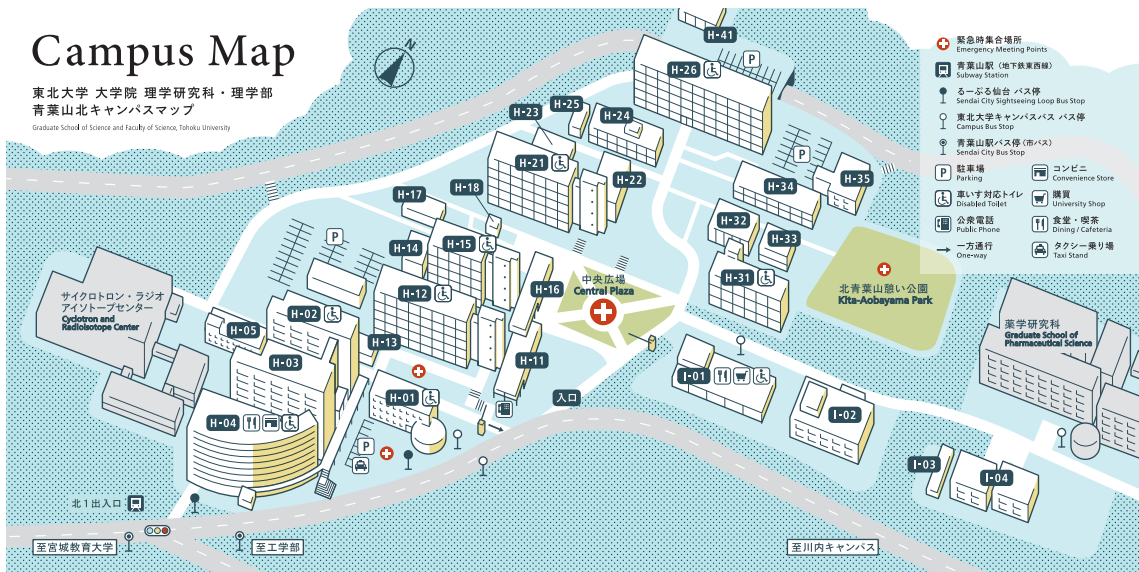
物理系研究棟（左）と物理・化学合同棟（右）



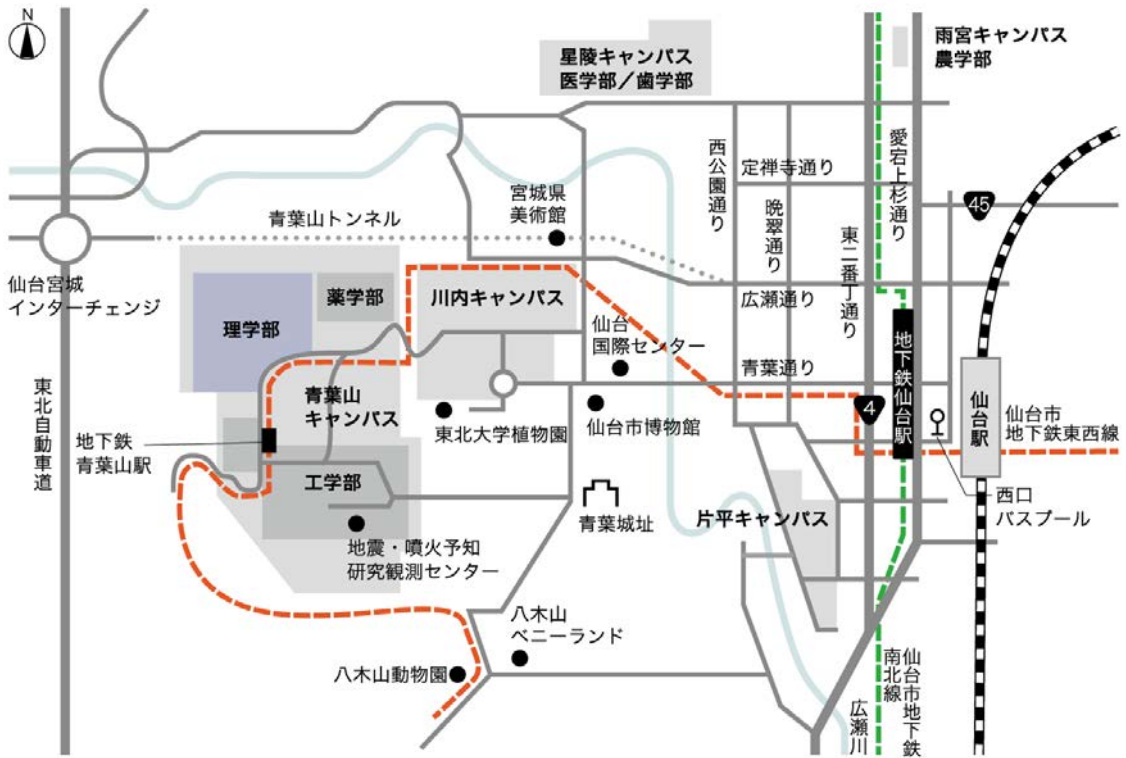
物理系研究棟は1975年完成。北青葉山地区移転に伴い建てられた建物の中で最大の床面積を誇る。2010年3月に改修が完成した。写真左端に物理講義棟の一部が微かに見えている。

# Campus Map

東北大学 大学院 理学研究科・理学部  
青葉山北キャンパスマップ  
Graduate School of Science and Faculty of Science, Tohoku University



H-01 自然史標本館 Museum of Natural History	H-12 地球科学系研究棟 Earth Science Building	H-18 超伝導核磁気共鳴装置棟 High Resolution NMR Systems Building	H-26 物理系研究棟 Physics Building	H-41 極低温科学センター棟 Center for Low Temperature Science
H-02 理学研究科合同A棟 Science Complex A	H-13 高温高压実験棟 High Pressure and High Temperature Laboratory	H-21 化学系研究棟 Chemistry Building	H-31 数学系研究棟 Mathematics Building	I-01 北青葉山厚生会館 Kita-Aobayama Commons
H-03 理学研究科合同B棟 Science Complex B	H-14 理学研究科共同実験棟 Science Joint Research Laboratory	H-22 化学系学生実験棟 Chemistry Students Laboratory	H-32 理学研究科大講義棟 Science Lectures Hall	I-02 附属図書館 北青葉山分館 Kita-Aobayama Library
H-04 理学研究科合同C棟 Science Complex C	H-15 生物学系研究棟 Biology Building	H-23 化学系講義棟 Chemistry Lecture Hall	H-33 数理科学記念館(川井ホール) Kawai Hall	I-03 ニュートリノ科学研究センター棟別館 Research Center For Neutrino Science Annex
H-05 理学研究科合同A棟別館 Science Complex Annex	H-16 生物学系研究棟別館 Biology Building Annex	H-24 物理系講義棟 Physics Lecture Hall	H-34 物理・化学合同棟 Physics & Chemistry Annex	I-04 ニュートリノ科学研究センター棟 Research Center For Neutrino Science
H-11 理学研究科事務棟 Science Administration Center	H-17 巨大分子解析センター棟 Research and Analytical Center for Giant Molecules	H-25 極低温科学センター棟別館 Center for Low Temperature Science Annex	H-35 機器開発研究棟 Machine Shop & Glass Laboratory	



交通: JR 仙台駅西口 地下鉄東西線仙台駅より地下鉄東西線

「八木山動物公園行き」にて9分、「青葉山駅」下車 徒歩5分

表紙説明：東北大学大学院理学研究科物理学専攻で実施されている研究の様子。素粒子・原子核分野から物性分野に至るまで幅広い領域において、理論・実験両面での様々な研究が実施されています。

表紙デザイン：金田文寛

#### 東北大学大学院理学研究科物理学専攻 案内

---

発行	2026年4月
編集	物理学専攻 パンフレット・広報委員会

---

問い合わせ先	〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3 東北大学大学院 理学研究科 教務課 教務企画係
電話	022-795-6494
ファックス	022-795-6345
電子メール	phys-kyom@grp.tohoku.ac.jp
Web ページ	<a href="https://www.phys.tohoku.ac.jp/">https://www.phys.tohoku.ac.jp/</a>

---