

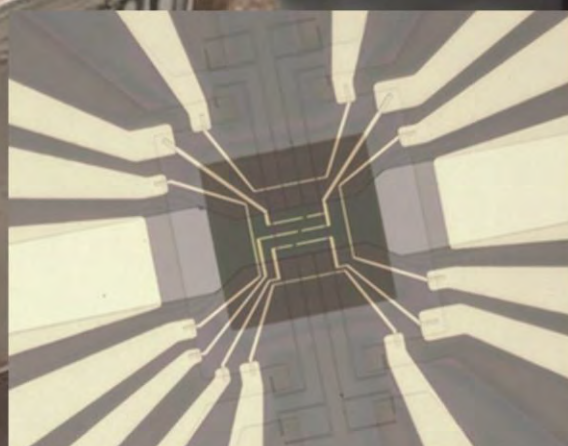


東北大学

東北大学大学院 理学研究科 物理学専攻案内 2021

Department of Physics
Graduate School of Science
Tohoku University

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



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、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。

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のために、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したものです。

本専攻は全国でも最大規模の専攻であり、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。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ています。

東北大学物理学専攻では、各研究分野の基礎および最先端のテーマについて、大学院生が指導教員と協力して国際的に第一線の研究を行っています。また本専攻の誇る充実した研究設備は層の厚い教授陣と大学院生に活用され、その高度な研究を支えています。このような実績に基づき、東北大学は 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）の分野で極めて高い評価（Nature Index tables: Institutions-Physical Sciences-Academic: 2020 国内3位）を得ています。

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、若い諸君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諸君が、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： <http://www.phys.tohoku.ac.jp/>

東北大学物理学専攻について

専攻の概要

物理学科の歴史は東北帝国大学の分科大学 (理科大学) が設置された 1911 年に始まります。創設当時の物理学科は海外留学から帰国したばかりの本多光太郎、愛知敬一、日下部四郎太という 3 人の若手教授に加えて、歌人としても名高い石原純助教授という体制でスタートし、教育と研究に心血が注がれるなか研究第一主義の伝統が生まれました。その後物理学科は順調に発展してきましたが、仙台大空襲による建物と研究設備の焼失によりその研究活動は一時中断することになります。戦後は新制の東北大学理学部で物理学 5 講座と鉄鋼学 3 講座により再出発し、1953 年には学制改革にともない東北大学大学院理学研究科物理学専攻がスタートしました。1967 年までには、物理学専攻、原子核理学専攻、物理学第二専攻をあわせて 20 講座の体制となり、名実ともに日本で有数の物理学教室になりました。

1994 年から、進展の著しい現代物理学の諸研究分野に柔軟かつ迅速に対応するための新しい研究教育組織を目指す大学院重点化が行われ、従来の物理学専攻、原子核理学専攻、物理学第二専攻が統合されて大学院理学研究科物理学専攻に一本化されました。

重点化された物理学専攻は 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）で構成されました。さらに、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、全学教育施設等を中心として新設されました。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、のちに電子光理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）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。自己推薦入試に関する詳細はWebページ http://www.phys.tohoku.ac.jp/admission/graduate-school_entrance/zenki2nen-jikosuisen/ にて案内しております。

出願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、高度な研究を発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) 2023 年 3 月末までに定年となる教員 (* 印) は、2022 年度入学者の指導教員にはなれない。
また 2022 年度入学者の指導にあたらぬ研究グループ名にも * 印を付す。

注 2) 教員名は、職位毎に姓の五十音順である。

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 ¹ 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	たかはし ふみのぶ 高橋 史宜	教授	12
			やまぐち まさひろ 山口 昌弘	教授	
			いしかわ ひろし 石川 洋	准教授	
			すみの ゆきなり 隅野 行成	准教授	
			よねくら かずや 米倉 和也	准教授	
			いん ぶん 殷 文	助教	
			きたじま なおや 北嶋 直弥	助教 ¹	
			ほった まさひろ 堀田 昌寛	助教	
			やまだ まさき 山田 将樹	助教 ¹	
			やまだ よういち 山田 洋一	助教	
		原子核理論 Nuclear Theory Group	ひやま えみこ 肥山 詠美子	教授	14
			さ さ き しょういち 佐々木 勝一	准教授	
			えんどう しんぺい 遠藤 晋平	助教 ¹	
			お の あきら 小野 章	助教	
			たにむら ゆうすけ 谷村 雄介	助教	
			とがし はじめ 富樫 甫	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
物性理論 Condensed Matter Theory	固体統計物理学講座 Theoretical Condensed Matter and Statistical Physics 1学際科学 フロンティア研究所 Frontier Research Institute for Interdisciplinary Science	物性理論 (理学部) Theoretical Condensed Matter and Statistical Physics Group	かわかつ としひろ 川勝 年洋	教授	16
			さいとう りいちょう 齋藤 理一郎	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	
			これつね たかし 是常 隆	准教授	
			いずみだ わたる 泉田 渉	助教	
			ム ハン マ ド Muhammad Shoufie Ukhtary	助教	
			お の あつし 小野 淳	助教	
			タン フ ン Tuan Hung	助教 ¹	
			グエン Nguyen		
			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	
			よこやま ひさとし 横山 寿敏	助教	
			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	

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: ニュートリノ科学 研究センター Research Center for Neutrino Science ¹ 高度教養教育 ・学生支援機構 Institute for Excellence in Higher Education	素粒子実験 (加速器) Experimental Particle Physics Group (Accelerators)	いちかわ あつこ 市川 温子 教授 さぬき ともゆき 佐貫 智行 准教授 なかむら きせき 中村 輝石 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 教授 きしもと やすひろ 岸本 康宏 教授 すえかね ふみひこ 末包 文彦 教授 いしどしろ こうじ 石徹白 晃治 准教授 こ が まさゆき 古賀 真之 准教授 しみず いたる 清水 格 准教授 みつゐ ただお 三井 唯夫 准教授 いけだ はるお 池田 晴雄 助教 いちむら こういち 市村 晃一 助教 がんだう よしひと 丸藤 祐仁 助教 わたなべ ひろこ 渡辺 寛子 助教 おざき ひでよし 尾崎 秀義 助教 おぼら しゅうへい 小原 脩平 助教		21
		原子核物理 Experimental Nuclear Physics Group	たむら ひろかず 田村 裕和 教授 なかむら さとし 中村 哲 教授 いわさ なおひと 岩佐 直仁 准教授 こいけ たけし 小池 武志 准教授 ¹ せきぐち きみこ 関口 仁子 准教授 み わ こうじ 三輪 浩司 准教授 かねた まさし 金田 雅司 助教 ながお しょう 永尾 翔 助教 はやかわ しゅうへい 早川 修平 助教 み き けんじろう 三木 謙二郎 助教 よしだ じゅんや 吉田 純也 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: 電子光理学研究センター Research Center for Electron Photon Science	原子核理学 Nuclear Science Group	おおにし ひろあき 大西 宏明	教授	25
			すだ としみ 須田 利美	教授	
			はま ひろゆき 濱 広幸	教授	
			かしわぎ しげる 柏木 茂	准教授	
			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	
			むらまつ のりひと 村松 憲仁	准教授	
			いしかわ たかつぐ 石川 貴嗣	助教	
			さだ ゆうた 佐田 優太	助教	
			ときやす あつし 時安 敦史	助教	
			ほんだ ゆうき 本多 佑記	助教	
			みやべ まなぶ 宮部 学	助教	
むとう としや 武藤 俊哉	助教				
	核放射線物理学 講座 Nuclear Radiation Physics 協力講座: サイクロトロン・ ラジオアイソトープ センター Cyclotron and Radioisotope Center	核放射線物理 Nuclear Radiation Physics Group	いとう まさとし 伊藤 正俊	教授	27
			てらかわ あつき 寺川 貴樹	教授	
	加速器科学講座 Accelerator Science ¹ 連携大学院: 日本原子力開発機構 Japan Atomic Energy Agency ² 連携大学院: 高エネルギー加速器研究機構 High Energy Accelerator Research Organization	加速器科学 Accelerator Science Group	きんしょう みちかず 金正 倫計	教授 ¹ (客員)	28
			はば じゅんじ 幅 淳二	教授 ^{2*} (委嘱)	

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 すがわら かつあき 菅原 克明 そうま せいご 相馬 清吾 なかやま こうすけ 中山 耕輔	教授 ¹ 准教授 准教授 ² 助教	29
		極低温量子物理 Low Temperature Quantum Physics Group	きむら のりあき 木村 憲彰 かべや のりゆき 壁谷 典幸	教授 助教	30
	1材料科学高等研究所 Advanced Institute for Materials Research 2スピントロニクス 学術連携研究教育センター Center for Spintronics Research Network	巨視的量子物性 Macroscopic Quantum Phenomena Group	おおぐし けんや 大串 研也 いまい よしのり 今井 良宗 あおやま たくや 青山 拓也	教授 准教授 助教	31
		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 しもたに ひでかず 下谷 秀和 さいとう まきな 齋藤 真器名 いしい ゆうた 石井 祐太	教授 准教授 准教授 助教	32
		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

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 なんぶ ゆうすけ 南部 雄亮 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 助教	34
		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 きまた もと 木俣 基 きはら たくみ 木原 工 もぎ いわお 茂木 巖	教授 准教授 助教 助教	35
		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	36
		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 いぐち さとし 井口 敏 すぎうら しおり 杉浦 菜理 ふるかわ てつや 古川 哲也	教授 准教授 助教 助教	37
		薄膜ヘテロ 界面物性 Thin Films and Heterointerfaces Research Group	つかざき あつし 塚崎 敦 ふじわら こうへい 藤原 宏平 しおがい じゅんいち 塩貝 純一 ねぎし まさみち 根岸 真通	教授 准教授 助教 助教	38
	強相関電子 物理学講座 Strongly Correlated Electron Physics ¹ 連携大学院: 高輝度光科学研究センター Japan Synchrotron Radiation Research Institute ² 連携大学院: 分子科学研究所 Institute for Molecular Science 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	いけもと ゆ か 池本 夕佳 け ち さとし 解良 聡 ふじもり しんいち 藤森 伸一	教授 ¹ (客員) 教授 ² (委嘱) 教授 ³ (客員)	39

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	量子物性物理学講座 Quantum Condensed Matter Physics 領域横断物理学講座 Soft Matter and Biophysics ¹ 高度教養教育・学生支援機構 Institute for Excellence in Higher Education	ソフトマター・生物物理 Soft Matter and Biophysics Group	いまい まさゆき 今井 正幸	教授	40
			さくま ゆか 佐久間 由香	講師	
			おおば てつひこ 大場 哲彦	助教	
		光物性物理 Solid State Photophysics Group	いしはら てるや 石原 照也	教授 *	41
			よしざわ まさゆき 吉澤 雅幸	教授	
		超高速分光 Ultrafast Spectroscopy Group	とみた さとし 富田 知志	准教授 ¹	42
			まつばら まさかず 松原 正和	准教授	
			おおの せいご 大野 誠吾	助教	
	結晶物理学講座 Crystal Physics 協力講座:金属材料研究所 Institute for Materials Research	量子ダイナミクス Quantum Dynamics Group	いわい しんいちろう 岩井 伸一郎	教授	43
			いとう ひろたけ 伊藤 弘毅	助教	
		スピント機能物質科学 Spin-Related Functional Materials Science Group	かわかみ ようへい 川上 洋平	助教	44
			ゆ さ ごう 遊佐 剛	教授	
			はしもと かつし 橋本 克之	助教	
		結晶成長物理 Crystal Growth Physics Group	お の せ よしのり 小野瀬 佳文	教授	45
			おおの ゆたか 大野 裕	准教授	
			に い よういち 新居 陽一	助教	
			ますだ ひでとし 増田 英俊	助教	
			ふじわら こうぞう 藤原 航三	教授	45
			もりと はるひこ 森戸 春彦	准教授	
			まえだ けんさく 前田 健作	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 Condensed Matter 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 教授 おがわ しゅういち 小川 修一 助教		46
		スピン量子物性 Quantum Spin Physics Group	さとう たく 佐藤 卓 教授 おくやま だいすけ 奥山 大輔 助教 な わ かずひろ 那波 和宏 助教		47
		電子線ナノ物理 Electron Crystallography and Spectroscopy Group	てらうち まさみ 寺内 正己 教授 さとう ようへい 佐藤 庸平 准教授 もりかわ だいすけ 森川 大輔 助教		48
		結晶構造物性 Structural Physics and Crystal Physics Group	きむら ひろゆき 木村 宏之 教授 さかくら てるとし 坂倉 輝俊 助教 やまもと はじめ 山本 孟 助教		49
	量子機能計測講座 Quantum Measurement and Functional Sensing ¹ 連携大学院: 高エネルギー加速器研究機構 High Energy Accelerator Research Organization ² 連携大学院:理化学研究所 RIKEN ³ 連携大学院: 田附興風会医学研究所北野病院 Tazuke Kofukai Medical Research Institute Kitano Hospital	量子機能計測 Quantum Measurement and Functional Sensing Group	あだち しんいち 足立 伸一 教授 ¹ (客員)		50
			おおたに ちこう 大谷 知行 教授 ² (客員)		
			つるやま たつあき 鶴山 竜昭 教授 ³ (客員)		

素粒子・宇宙理論グループ

Particle Theory and Cosmology Group

高橋 史宜 教授 山口 昌弘 教授

石川 洋 准教授 隅野 行成 准教授 米倉 和也 准教授

殷 文 助教 北嶋 直弥 助教 堀田 昌寛 助教 山田 將樹 助教 山田 洋一 助教

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

素粒子物理は物質の究極の姿を対象とする分野であり、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研究するのが目的である。

素粒子物理の基礎となっているのは量子力学と相対論である。素粒子物理の対象は物質のミクロな構造であるが、短い距離を探ることは不確定性関係ゆえ高いエネルギー領域に対応する。素粒子物理が高エネルギー物理ともよばれるゆえである。素粒子の物理法則を記述するには相対論的な量子場の理論が用いられ、その中でもゲージ理論と呼ばれる理論は特に重要である。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る。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ければならないが、これを引き起こすヒッグス粒子は2012年に発見された。この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と呼ばれる。この理論の構築は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過言ではない。

標準模型は、豊かで美しい構造を持った理論である。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、標準模型は高い精度で現在のほとんどの実験データを説明することが確かめられている。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る。それらの謎は、今後素粒子物理法則を深く追究する際に重要な道標となる筈である。例えば電弱スケールの安定性はヒッグス粒子の存在と密接に関係する謎である。

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る。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、及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ある。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現在重要となっている。QCDは強結合の理論ゆえに難解である。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。QCDの持つ漸近自由性という性質のため、高エネルギー側では陽子や中性子などの核子ではなく、素粒子であるクォークやグルーオンが主役である。このように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の発展のための重要課題である。

一方、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る。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ある。宇宙進化に重要な役割を果たすのは、加速器実験では未踏の超高エネルギー領域の物理である。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る。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はじまり、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た。宇宙初期を研究するには素粒子理論の知識が必要不可欠であり、また、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る。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る。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るが、これらは素粒子の標準模型の枠内では説明できず、新たな素粒子物理学を必要としていることは興味深いことであり、宇宙の組成を説明することはそこに住む我々にとって重要な課題である。

ところで、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、一般相対論という美しい理論が存在する。しかし、これは古典論であり、量子力学的な重力の理論は未完成である。量子重力を含んだ全てを統一する有力な候補として超弦理論がある。超弦理論は重力子の存在を必然的に予言する。また、過去には異なると思われていた複数の超弦理論が、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った。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る。

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る。概念的にも、例えば 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る。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ない。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らず、理解を積み上げることが重要である。

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る。以下に主なものをあげてみよう。

(1) 高エネルギー現象の理論的研究

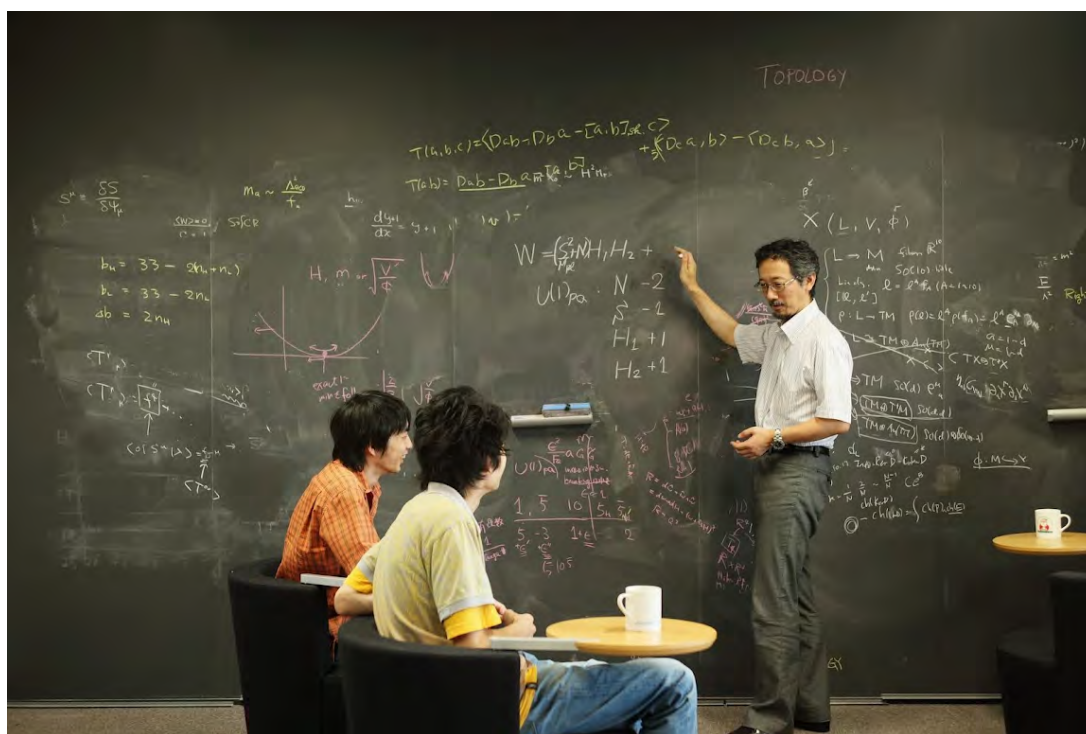
稼働中および計画中の高エネルギー最前線のコライダー実験における素粒子現象の理論的研究や、様々な精密測定における新現象の出現についての理論的研究を行っている。

(2) 初期宇宙の研究

素粒子理論に立脚した整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、バリオン数生成、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る。

(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る。



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

遠藤 晋平 助教 小野 章 助教 谷村 雄介 助教 富樫 甫 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」に関係した非常に広範囲の理論的研究を行っています。図1の右から左に向かって、長さのスケールで見たときの分子から素粒子までの階層構造を表しています。

強い相互作用は、約 10^{-14} m 以下のミクロな世界でのみ働く力で、大きく二つの階層に分類できます。一つは多数のクォーク・グルーオンから成る量子多体系としてのハドロン（陽子や中性子などの重粒子や π 中間子などの中間子およびその励起状態）が研究対象となる階層です。もう一つは、多数の核子（陽子や中性子の総称）とハイペロンと呼ばれるストレンジネスを含む重粒子から成る量子多体系としての原子核やハイパー核が研究対象となる階層です。

どちらも強い相互作用に支配される世界で、これらの二つの階層に関連した研究を行っています。さらには、核子などの重粒子が極限まで巨視的に集まって存在する中性子星の研究や、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についても、「強く相関する量子系」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。

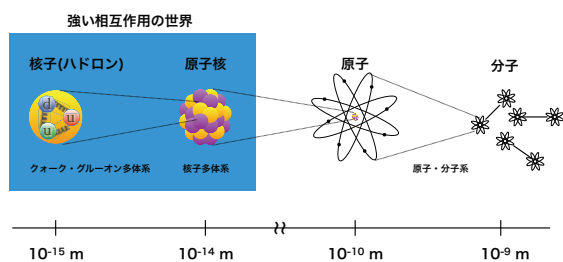


図1: 長さのスケールで見る階層性と強い相互作用の世界

ハドロンと格子QCD: 強い相互作用の基礎理論はハドロンの構成要素であるクォークとグルーオンを自由度として記述される量子色力学(QCD)として知られていて、この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が、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。

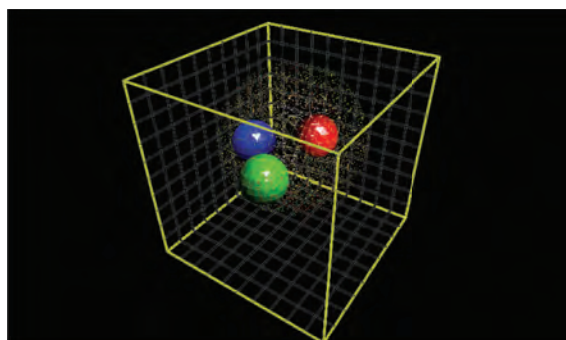


図2: 格子QCDのイメージ図（計算の便宜上、クォーク、グルーオンを格子状に配置して第一原理計算を行います）

原子核の微視的理論: 原子核は核子が核力という強い相互作用により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。

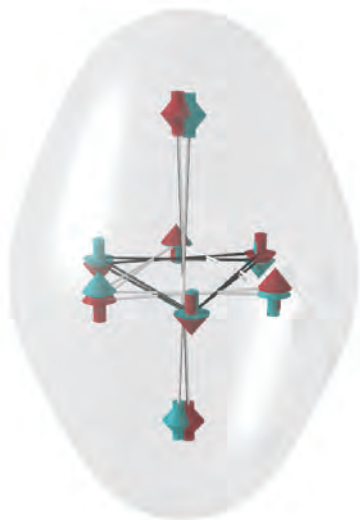


図3：微視的理論で得られた、 $^{20}_{10}\text{Ne}_{10}$ 核の最も確からしい核子（陽子：赤、中性子：青）の配置とスピンの向き。コア核を中心に上下に α 粒子のクラスター構造が形成されていることを示唆しています。

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ことが重要となります。「無限小ガウス・ローブ基底関数」を用いたガウス展開法という独自の計算法を開発、この計算法を、原子核、ハドロン、原子分野に幅広く適用し、更なる新しい分野への研究展開が期待されます。

高密度天体への応用：無数の核子で構成された無限に大きい原子核は核物質と呼ばれ、その性質は中性子星の構造、超新星爆発のメカニズム、さらに重力波の源となる連星中性子星合体などの高密度天体現象を理解する重要な鍵となります。これらの天体現象から原子核物理の情報を精度良く引き出すため、核物質の性質を表す方程式（状態方程式と呼びます）を複雑な核力から理論的に導き出し、様々な高密度天体現象に適用する研究を進めています。



図4：連星中性子星合体のイメージ図 (Image Credit: University of Warwick/Mark Garlick)

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

川勝 年洋 教授 齋藤 理一郎 教授* 柴田 尚和 教授

内田 就也 准教授 是常 隆 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 横山 寿敏 助教

Tuan Hung Nguyen 助教 Muhammad Shoufie Ukhtary 助教

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

物性理論の研究対象

物性理論の目的は個々の凝縮系の興味ある性質の研究を通して、普遍的な物理法則を明らかにすることである。対象となる凝縮系は天文学的規模の数の原子や電子が集まった系であり、強相関電子系やグラフェンからナノ構造物質やソフトマターまで多岐にわたる。近年、研究手法や概念の発展に伴い研究の対象が大幅に拡大している。他分野との「境界領域」である、非平衡、量子情報、トポロジー、生体系、素粒子物理や一般相対性理論との融合領域などが一例である。また実験研究との連携においても、物性理論の果たす役割は重要になっている。

研究室の構成と特徴

教授・准教授が中心となる小グループを組織しており、教育と研究は教員と院生との個別的な指導と協力により行われている。また物性理論グループ全体で、コロキウム、計算機の利用、懇親会などの幅広い交流がなされている。多くの外国人ビジターに加え、外国人のポスドクや学生が在籍しており、研究活動の中で語学力や国際的な視点を身につけることができる。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り、物性研究のほぼすべての領域をカバーしている。物性理論の研究を志望する諸君には、物理学に新しい貢献をもたらす最先端の研究をめざすと同時に、基礎的な物理の知識を深くかつ広範に学ぶことが望まれる。

研究グループの紹介

[1] ソフトマターの非平衡統計物理学（川勝、村島）

ソフトマターは、高分子、液晶、界面活性

剤、膜等の物質群の総称であり、系に内在する多階層の構造に起因した柔軟な力学特性を示すことがその特徴である。このような多階層構造を持つ系を対象として、統計物理学の手法を用いた理論的なモデル化とともに、ミクロスケール（分子スケール）とマクロスケール（流体スケール）を連携させるマルチスケールシミュレーションによる研究を行っている。

[2] ナノチューブ・グラフェン・原子層物質の物理（齋藤、泉田、中島、Nguyen、Ukhtary）

カーボンナノチューブ、グラフェン、原子層物質（通常の固体を1原子の厚さにした、1次元（線）または2次元（面）の新規物質）の固体物理、特に光物性。齋藤・グエン・ウータリは、ナノチューブや原子層物質の光に対する特性を、解析的手法および第一原理計算による数値的手法で求める。特に円偏光に対するバレー偏極や励起子、表面プラズモン、コヒーレントフォノン、共鳴ラマン分光理論、熱電変換効率などの計算などを行っている。泉田は、有限長ナノチューブの閉じ込め効果やスピン軌道相互作用など、量子伝導領域のナノチューブの物性を、数値的および解析的な方法により研究する。中島は、貴金属製の球や分割リング共振器からなる人工層状物質（メタマテリアル）における近接場効果や負屈折率光伝搬現象を量子論的手法により追求する。

[3] 低次元強相関電子系の研究（柴田）

物質中の有効電子間相互作用が弱い場合、フェルミ面の存在によって低温、低エネルギーの電子の性質は自由電子の性質と質的に同じになる。これは、ランダウのフェルミ液体論の帰結であり、相互作用があっても一電子的描像が

成り立つことを説明する。しかし、 d 軌道や f 軌道という空間的に局在した原子軌道を電子が部分的に占有するときには、電子間の相互作用の効果が強く働き、フェルミ液体論の前提となるフェルミ面の特異性が失われることで、フェルミ液体論は破綻する。本研究グループでは、このような強相関電子系の代表例である重い電子系、遷移金属酸化物、量子スピン系、量子ホール系における量子多体効果の研究を行っている。

[4] 細胞の非平衡・非線形ダイナミクス (内田)

生命の単位である細胞は強い非平衡状態にあってさまざまな動的現象を示す。化学エネルギーを運動エネルギーに変換する分子モーターが鞭毛、繊毛や細胞骨格を構成するフィラメントを駆動し、それらが自己組織化して細胞の遊泳、遊走や分裂など巨視的な運動として現れる。また多数の細胞の相互作用によって集団運動や多細胞生物の形態形成が引き起こされる。これらの現象は物理学の新たな対象として、ソフトマターや非平衡統計力学、非線形動力学の観点から研究が進められている。本研究グループでは、細胞の遊泳や物質輸送を司る鞭毛や繊毛を中心に、細胞や細胞集団のダイナミクスを流体力学、同期現象、相転移などの理論を用いて研究している。

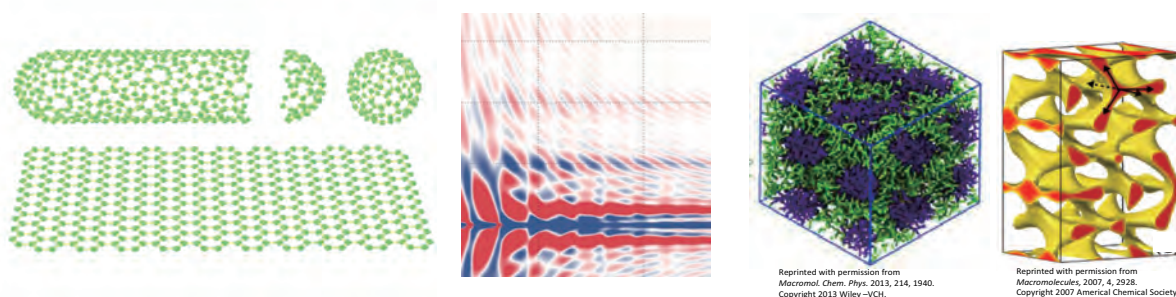
[5] 第一原理計算を用いた物性解明 (是常)

第一原理計算とは物質の結晶構造のみをインプットとし、物質に依存するパラメータを用いず、非経験的に電子状態を計算する手法であ

る。近年、この第一原理計算に基づいて様々な物性が議論されるようになってきており、実験と理論の比較になくはならない手法となりつつある。本研究グループでは、この第一原理計算の適用範囲を拡大し、より広範な物性を解明、予言していくことを目指している。具体的には、超伝導体や磁性体の物性、異常ホール効果や異常ネルンスト効果のような輸送現象などを研究している。また、様々な物質に対する計算データの蓄積とそのデータ科学的手法を用いた解析により、第一原理計算に基づく物質設計を目指した研究も行っている。

[6] 相互作用の強い電子系の量子物性 (小野、横山)

電子間に働くクーロン相互や電子格子相互作用が強い系では、その多体効果、非線形効果と電子が本来持つ量子効果、量子統計性が絡み合い、バンド計算などの一電子近似では予想がつかない非自明な現象が現れる。高い転移温度を持つ超伝導、相互作用による金属絶縁体転移、量子スピン液体はその一例である。本研究グループでは数値的計算手法と解析的計算手法を駆使することで、多体電子系が織りなす新しい量子物性の起源の解明と理論予測を行っている。代表的なテーマを以下に挙げる。多電子系の新規な超伝導、磁性、誘電性、光物性。多体系における強い非平衡状態、過渡状態。電子間相互作用と電子格子相互作用との協力と競合。高温超伝導や冷却原子系の物性。重い電子系の磁性と超伝導。



(左) フラーレン・ナノチューブ・グラフェン。(中央) モット絶縁体の過渡電子励起スペクトル。
(右) ブロック共重合体のマイクロ相分離構造の分子モデルと場のモデル。

金研理論物理グループ*

IMR Theoretical Physics Group

野村 健太郎 准教授*

<http://www.bauer-lab.imr.tohoku.ac.jp/> Tel: 022-215-2005

IT 技術を支えるデバイスの性能指数は、技術開発とともに指数関数的に増大してきた（ムーアの法則）が、微細化の限界に近づくにつれ破綻しつつある。この課題を克服するため、これまでとは原理的に異なる新しいデバイスの開発が必要になっている。当理論グループは、強磁性体及び超伝導体の微小構造を利用してこの課題に答えることを目指している。具体的には、ナノスケールの微小構造の輸送特性を量子力学的に理解することにより、優れた性質を持つ微小構造体の開発につながる基礎研究を行っている。これにより、金属、半導体、絶縁体、磁性体、超伝導体からなる新しい材料、構造、およびデバイスが示す多彩な物理現象をより深く理解できるようになるだけでなく、新しい物理現象を予測することもできるようになる。また、新しい概念・原理に基づいたナノデバイス、ナノエンジン、ナノモーターなどの新機能素子を提案することも目指している。

当理論グループは、ナノ構造内の電子の持つスピンに対する量子論を中心に研究を行っている。電子の持つ電荷とスピン、また、その流れである電流とスピン流を有効に利用し制御することを目指す研究分野をスピントロニクスと呼ぶ。ごく最近、スピンが熱流と強く結合することが明らかにされ、スピン・カロリトロニクスと呼ばれる新しい分野が生まれた（図 1）。我々は、量子ナノ物性グループ（金研）によって発見された、スピン・ゼーベック効果の研究を精力的におこなっている。さらに、ナノスケールのバーネット効果（図 2）やアインシュタイン・ドハース効果など、磁気とメカニカルな自由度が強く結びついた研究分野の開拓も行っている。当研究グループでは他にも、強いスピン軌道相互作用によってもたらされるトポロジカル量子現象における電子相関や

乱れの効果、電気磁気結合、超伝導、回転に対する応答を研究している。

当理論グループは、国内外の実験グループ、および世界の理論家と緊密な研究協力のネットワークを利用し、競争的、国際的な研究環境を提供する。

現在の研究テーマ：スピントロニクス、スピン・カロリトロニクス、天文微粒子、超伝導、グラフェン、トポロジカル絶縁体・超伝導体

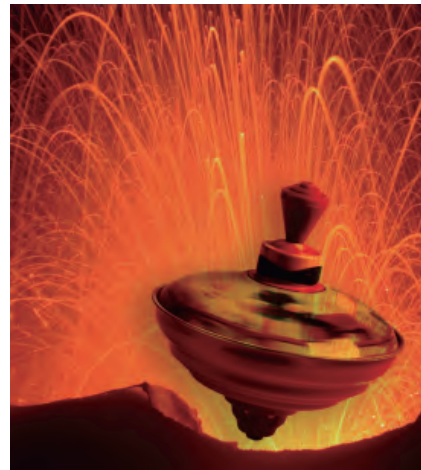


図 1. スピン・カロリトロニクスのイメージ。熱がスピン角運動量と相互作用する。

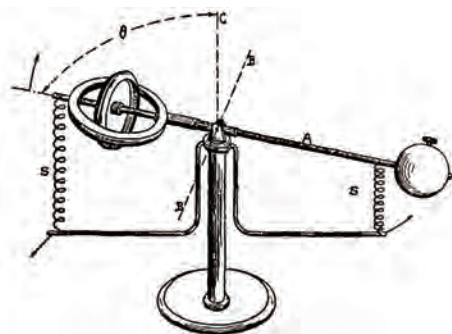


図 2. バーネット効果の古典的アナロジー。ジャイロスコープが回転（スピン）すると A 軸の傾き θ が変化する。

素粒子実験（加速器）グループ

Elementary Particle Physics (Accelerators) Group

市川 温子 教授 佐貫 智行 准教授 中村 輝石 助教

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

E-mail: 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、重いクォークやヒッグス粒子の性質を調べる、あるいはニュートリノを生成し 300 キロメートル走行後の性質の変化を測定するなどの研究を進めています。また、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も目指しています。

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。

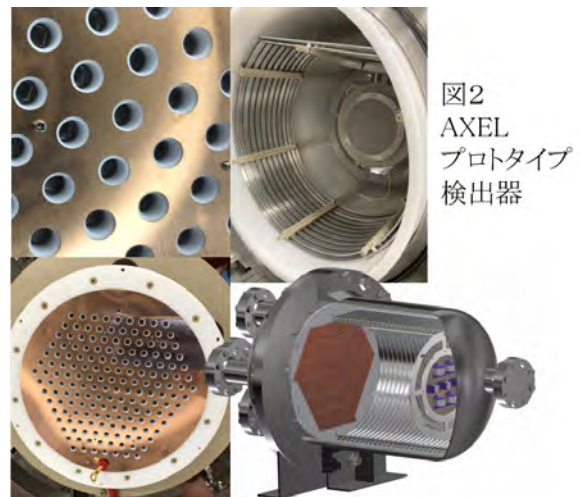
当研究グループでは、図 1 に示す国際共同実験 T2K(ティーツーケー) およびハイパーカ

ミオカンデ計画を推し進め、「ニュートリノにおける粒子・反粒子対称性（CP 対称性）の破れ」の探索を進めています。茨城県東海村にある J-PARC 加速器で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する T2K 実験では、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。そのために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器していますが、ハイパーカミオカンデ計画では、26 万トンの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。今後、T2K 実験、そして 2027 年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 対称性の破れているのか、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。

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索



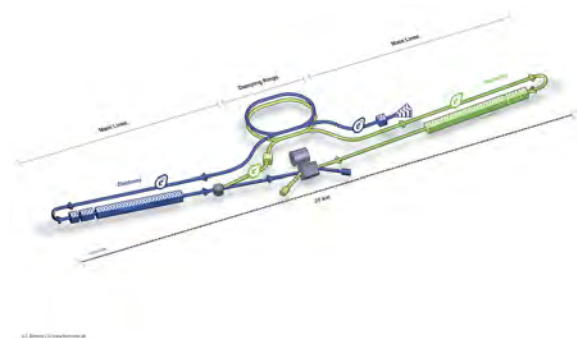
図 1 T2K 実験の概念図



上記の「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。ベータ崩壊が2回同時に起きる二重ベータ崩壊では反ニュートリノが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。図2は現在開発中の AXEL 検出器のプロトタイプ検出器です。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も用います。私達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のできる高性能検出器です。

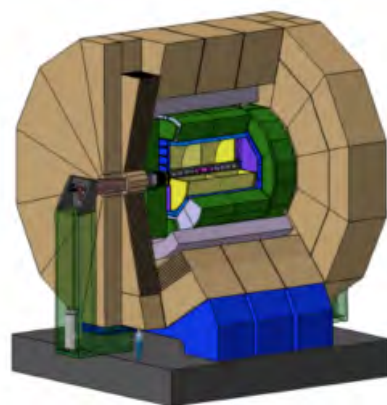
国際リニアコライダー（ILC）

国際リニアコライダー（ILC）は次世代の大型加速器として世界的に推進されている計画で、電子と陽電子を全長約 20km の線形加速器でそれぞれ陽子の重さの 125 倍のエネルギーになるまで加速し正面衝突させ、ビッグバン直後の状態を再現しようとしています。研究者たちは、岩手県と宮城県に広がる北上山地をこの ILC の建設候補地として決定しました。円形の加速器の場合は電子を高エネルギーに加速するとシンクロトロン放射によりエネルギーの 4 乗に比例してビームエネルギーを失いますが、ILC のように線形の場合にはシンクロトロン放射によるエネルギー損失は小さく、それゆえに将来のエネルギー高度化の可能性は ILC の大きな利点となっています。



国際リニアコライダーの概念図

衝突によって生成される粒子にヒッグス粒子があります。ヒッグス粒子は現在の素粒子の「標準理論」において全ての素粒子の質量の起源となっている粒子です。2012 年 7 月、スイスとフランスの国境にある CERN 研究所の大ハドロン衝突器（LHC）でヒッグス粒子が発見されました。この粒子を発見するのに LHC は約 2 年かかりましたが、ILC では 1 日で見えてしまいます。LHC は今後もビーム強度を高度化していきますが、ヒッグス粒子の精密測定に関して、ILC は高度化された究極の LHC が数十基同時に稼働するのと同等のパワーがあります。



ILC 測定器

私たちのグループは ILC 推進の拠点の一つとして活発な活動を続けています。ヒッグス粒子の性質がどのくらいの精度で測定できるのか、標準理論を超える理論がもしあるとすればそれはどのくらいの感度で発見できるのかなどを研究する一方で、詳細なコンピュータ・シミュレーションによって測定器設計の最適化を行っています。また、検出器の研究開発を進めています。

Belle II 実験

茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構の B ファクトリー SuperKEKB では、電子と陽電子を加速し正面衝突させて b クォークを含む B 中間子、反 b クォークを含む反 B 中間子を生成しています。これを用いてさまざまな測定をする実験が Belle II（ベルツー）実験です。2010 年まで行われていた前身の Belle 実験に比べて 50 倍のデータを貯めることで素粒子標準理論では説明のつかない新しい現象を探します。当研究室も寄与することで Belle II 実験は 2019 年に本格的なデータ取得を開始し、測定結果が出つつあります。

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 末包 文彦 教授 古賀 真之 准教授
清水 格 准教授 三井 唯夫 准教授 石徹白 晃治 准教授 池田 晴雄 助教
渡辺 寛子 助教 市村 晃一 助教 丸藤 祐仁 助教 尾崎秀義 助教 小原 脩平 助教

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

E-mail: 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ある。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さまよい、地球や太陽、銀河からは絶えず素粒子が放出され、地上に降り注いでくる。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である。中でもニュートリノは弱い相互作用しかないため、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る。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る。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ある。

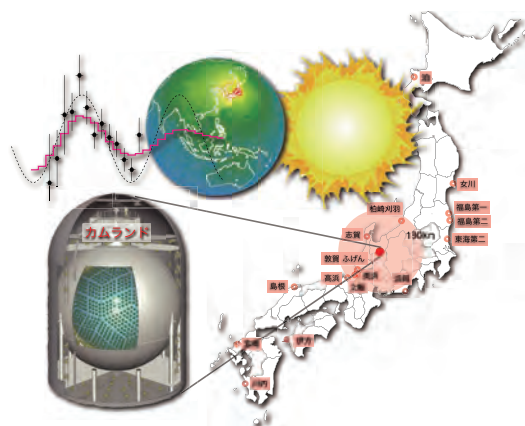
カムランド実験

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構造・形成の研究、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、世界最大の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1,000 mに完成させた。

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。

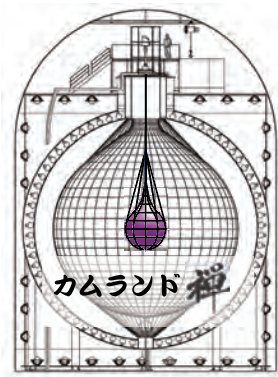
また、地球内部からのニュートリノの観測に

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」を切りひらいた。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するものであり、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る。

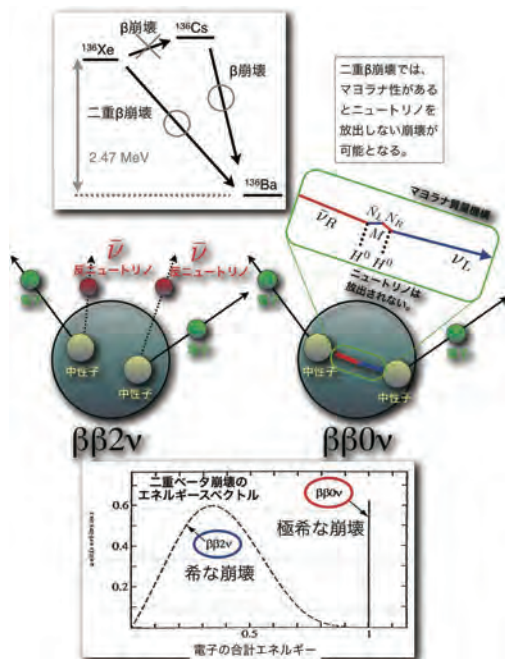


今では、カムランドの観測精度向上により地熱に占める放射性物質の寄与の割合を検証できるようになってきているが、特に停止している原子炉が多い現状は地球ニュートリノ観測の精度向上に適しており、急速な発展が見込まれる。さらなるニュートリノ利用の実践として、太陽ニュートリノ観測による太陽内部の直接観測とそれによる恒星進化の究明、超新星爆発ニュートリノの観測による宇宙の進化の研究、重力波望遠鏡と連携したマルチメッセンジャー宇宙観測なども推進する。

並行して、カムランドの極低バックグラウンド環境を活用した ^{136}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」が実施されている。



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あり、ニュートリノの質量構造も決定することができる。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る。カムランド禅は、カムランドの巨大かつ極低バックグラウンドの環境を活かして世界最高感度での観測を行っており、装置の大幅改造も提案している。



また将来に向けた技術開発として、反ニュートリノ方向観測の感度を持たせるための液体シンチレータ、光学系、光センサーの開発も行っており、原子炉非破壊診断などの実用的な応用展開も見込まれる。その他、10mK 希釈冷凍機や9テスラ 4K 冷凍機を使ったアクシオンを含

む軽い暗黒物質探索のための開発、100 トン級の二重ベータ崩壊核を実現するための開発なども実施しており、アイデア次第で多様な発展が期待できる状況にある。

Double Chooz, JSNS², DaRveX 実験

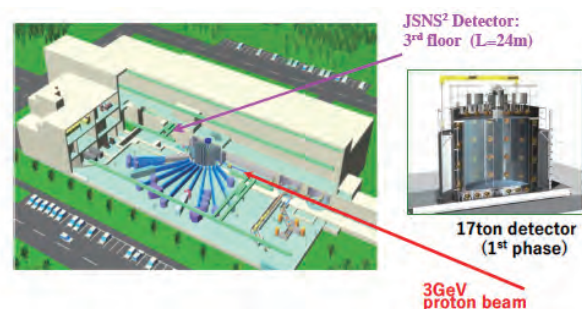
本研究グループは、フランスの Chooz 原子力発電所で Double Chooz 実験を行い、スーパーカミオカンデ、カムランドに続く、第3のニュートリノ振動を検出することに成功し、 θ_{13} と呼ばれるニュートリノ混合角を次のように測定した。

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.105 \pm 0.014$$

基礎パラメータである θ_{13} の大きさを明らかにすることで、素粒子の標準模型では説明することができないニュートリノ振動に対する理解を深めることができ、ニュートリノ反応での CP 非対称性などの多くの謎の解決への道筋を示すことができる。Double Chooz 実験は 2018 年にデータ収集を終了し、今後は収集したデータの解析を続ける。

2013 年からは、ステライルニュートリノと呼ばれる、標準理論には含まれない第4のニュートリノの検出をめざし、J-PARC で JSNS² 実験を行っている（下図）。もし第4のニュートリノが発見されれば、素粒子物理に非常に大きな衝撃を与えることになる。

2020 年からは、J-PARC MLF で低エネルギー ν_e と鉛の反応 $\nu_e + \text{Pb} \rightarrow e^- + \text{Bi} + n$ の断面積の測定準備を行っている (DaRveX 実験)。この測定により、鉛を ν_e のターゲットとして使用できるようになり、これまでの $\bar{\nu}_e$ に加えて、低エネルギー ν_e の振動、超新星爆発で発生する ν_e の測定などが可能になる。



原子核物理グループ

Experimental Nuclear Physics Group

田村 裕和 教授 中村 哲 教授

岩佐 直仁 准教授 小池 武志 准教授¹ 関口 仁子 准教授 三輪 浩司 准教授

金田 雅司 助教 永尾 翔 助教 早川 修平 助教 三木 謙二郎 助教 吉田 純也 助教

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

E-mail: tamura@lambda.phys.tohoku.ac.jp Tel: 022-795-6454 (田村)

原子核物理のフロンティアは、加速器の急速な進歩により近年めざましく拡大している。図 1 に示すように、従来研究されてきた通常の原子核とは本質的に異なる様々な極限状態の原子核を生成し、その性質を実験的に研究することが可能となってきた。こうした研究によって、我々の物質観は大きく拡張されつつある。

当研究室は、極限状態の原子核として、(1) 核子（陽子、中性子）以外にラムダ、グザイ粒子などのハイペロン（“ストレンジネス”量子数をもつ、すなわちストレンジクォークをもつバリオン）を構成要素として含むハイパー原子核（図 1 左上）や、(2) 陽子数と中性子数のバランスが大きく崩れた原子核である陽子・中性子過剰核（図 1 右上）を実験的に生成し、その性質を研究している。また、(3) 原子核を構成する核子間に働く 3 体力、および (4) 短寿命原子核についても研究を進めている。実験は、国内外の加速器施設において様々なエネルギーの π/K 中間子、電子、原子核、RI（不安定原子核）、偏極重陽子のビームを駆使して行っている。

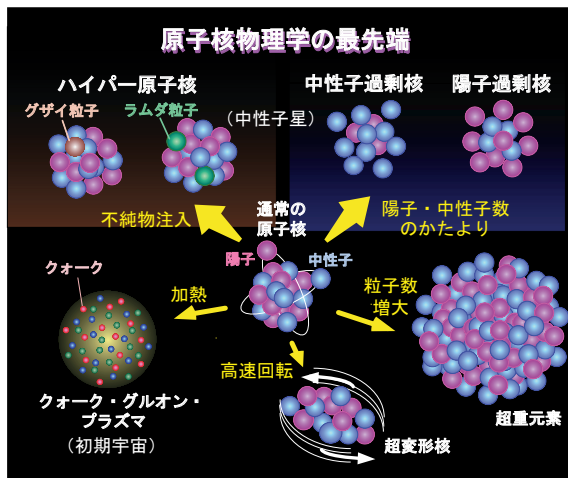


図 1. 原子核物理学の最先端

1. ストレンジネス原子核物理

この世界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るが、そこにストレンジクォークを加えることで新しい物質世界が拓かれるとともに、クォーク多体系の一種である原子核のより本質的な理解が可能になる。

まずハイパー核構造の研究やハイペロンの散乱実験によりハイペロン・核子間の力が明らかになり、核力をバリオン間力へ拡張して統一的に考えることで、複雑な核力をその下のクォークの階層から理解する道が開ける。また超高密度の中性子星内部ではハイペロンが安定に存在し、中性子星自体が巨大ハイパー核になっていると予想されているが、我々の研究はその解明のために不可欠である。さらに核内で核子によるパウリ排他律を受けないハイペロンを探针として、原子核深部での核子（バリオン）の振舞いや構造変化を探ることができる。

当グループでは、ラムダハイパー核の分光を中心にストレンジネスをもつハドロン多体系の物理（ストレンジネス核物理）の実験研究を以下のように推進している。(1) 米国ジェファークソン国立研究所 (JLab) において我々は $(e, e'K^+)$ 反応によるラムダハイパー核分光実験という新しい研究手法を創始し、その後高分解能磁気スペクトロメータ (HKS, HES) を導入し (図 2 左) 実験を成功させた。現在、JLab での次期計画の準備とともに、ドイツマインツ大学 MAMI 加速器施設において、KAOS スペクトロメータ (図 2 右) を用いたハイパー核電磁生成分光実験とハイパー核崩壊パイ中間子分光実験を展開している。(2) 我々は世界で唯一、ハイパー核からの γ 線の測定技術をもつ。このハイパー核精密 γ 分光法により、我々の開発した大型半導体検出器群 (図 3) と J-PARC の大強度ビームを用いて核内のラムダ粒子の磁気モーメントを測定し、粒子の性質が核内に入ると変化するのかどうかを突き止める世

¹ 高教機構

界初の実験を準備している。また中性子星内部の解明に直結するハイペロン・核子の相互作用を調べるため、J-PARC で画期的なシグマ・陽子散乱実験を実施した。現在、ラムダ・陽子散乱実験を準備している。(3) 本学電子光物理学研究センターの 1.3 GeV 電子加速器において、我々の開発した NKS2 スペクトロメータを用いて Λn 終状態相互作用、 ${}^3_\Lambda\text{H}$ ハイパー核寿命測定、さらに η/d 束縛状態探索といった新実験を準備し電磁プローブによるストレンジネス核物理を主軸として研究を展開している。

この (1)、(2)、(3) は、いずれも世界の最先端を切り拓く研究で、当グループを中心に他大学や外国の研究者も加わっており、当グループ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る。

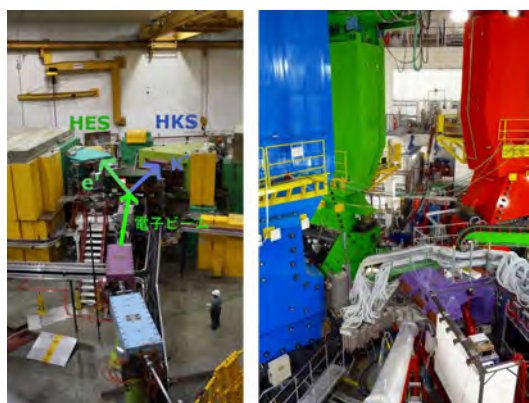


図 2. (左) 米国 JLab に設置した HKS および HES。(右) ドイツ MAMI-C の Spek-A, B, C スペクトロメータ (赤, 青, 緑) と KAOS (紫)。



図 3. (左) ハイパー核 γ 線が精密に測れる世界唯一の装置 Hyperball-J と、(右) その心臓部。

2. エキゾチック核と核力の物理

近年、三つの核子が同時に作用する事で生じる三体核力が、元素合成の仕組みを理解する鍵となるエキゾチック核 (中性子・陽子過剰核) や、星の終焉である超新星爆発や中性子星の存在を理解する上で不可欠であることがわかってきた。三体核力には、核子内部のクォークの動きをとらえられるという面白さもある。

これまでに我々のグループでは、理研 RIBF において偏極重陽子ビームを用いた三核子系

散乱の高精度測定から世界で初めて三体核力の証拠を示すことに成功している。

現在我々は、三体核力を含む核力の全貌を明らかにし、核力によって原子核、星がどのように形成されてゆくのか (エキゾチック核の生成) を理解するため、少数核子系散乱の実験研究を推進している。実験研究は、偏極ビーム・標的等の実験装置の開発 (図 4) も含め、東北大 CYRIC、理研 RIBF、大阪大学 RCNP を拠点として行っている。



図 4. 東北大 CYRIC で開発中の偏極 ${}^3\text{He}$ 標的

3. 短寿命核ビーム物理

水素を除く全ての元素は、初期宇宙や星などで起こる原子核反応で合成されたものである。特に、質量数 70 以上の元素の約半分とウラン・トリウムは、超新星爆発・中性子星合体で起こる爆発的元素合成で作られたと考えられている。しかし、爆発的元素合成反応経路上の短寿命核には質量・半減期・原子核反応率がわかっていないものが多く、いつ、どこで、どれだけの元素が合成されたかはまだ明らかになっていない。

我々は、宇宙核物理学における諸問題を解明するために、(1) 天体核反応の反応率の実験的研究、(2) 元素合成経路上の未確認の短寿命核の探索、(3) 短寿命核ビームを用いた原子核反応による短寿命核の構造の研究を行っている。実験は、理研 RIBF、東大 CNS、原研タンデム、東北大 CYRIC、ドイツ GSI で行っている。

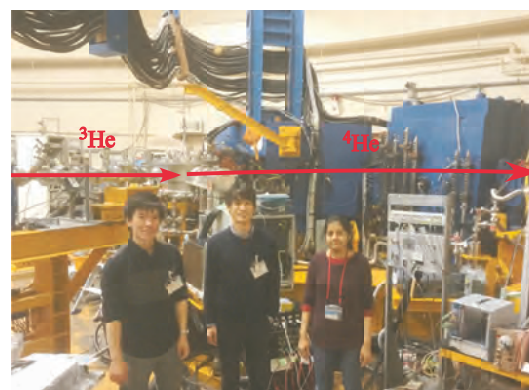


図 5. 原研タンデムで行った実験で使った磁気分析装置 ENMA

原子核理学グループ

Nuclear Science Group

大西 宏明 教授 須田 利美 教授 濱 広幸 教授

柏木 茂 准教授 菊永 英寿 准教授 日出 富士雄 准教授 村松 憲仁 准教授

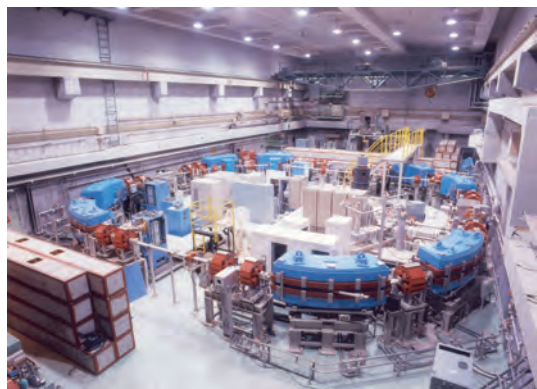
石川 貴嗣 助教 佐田 優太 助教 時安 敦史 助教

本多 佑記 助教 宮部 学 助教 武藤 俊哉 助教

<https://www.lns.tohoku.ac.jp/> email: koho@lns.tohoku.ac.jp

原子核理学研究グループは、電子光物理学研究センターを拠点にして、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る。電子光物理学研究センターは、二つの電子線形加速器（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（電子光物理学研究拠点）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ある。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る。

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する。



1.3 GeV 電子シンクロトロン（BST リング）

クォーク核物理

クォークで構成される基本粒子「ハドロン」は、非摂動的な強い力の影響で多様な形態および相互作用を現す。特に、SPring-8/LEPS における 5 つのクォークからなるペンタクォーク粒子 Θ^+ の発見は世界的な話題となった。クォーク核物理研究グループは、SPring-8 における Θ^+ の研究を続ける一方で、センターの加速器で得られる高エネルギー光子ビームを用いてエータ (η) 中間子光生成の精密測定を行い、ストレンジネスを露わに含まないペンタクォーク粒子の候補を発見した。この研究では、反応

で生じた複数のガンマ線をすべて検出することを目的として、全立体角を覆う電磁カロリメータ FOREST（総重量 5 t）を整備した。ハドロン間相互作用の研究などをさらに推し進める。



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、宇宙開闢後間もない頃の高温状態や、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、多彩な様相を呈する。我々はこの「QCD 真空」を、その相互規範的である「ハドロン」の特性変化を通じて明らかにすることも目標としている。このため、1320 本の BGO 単結晶で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 へ移設した。既に本格的な研究が始まっており、身近な高密度状態である原子核内部（1 cm³ 当たり約 1 億トン）で生成されたハドロンの崩壊を BGOegg で詳しく調べている。QCD 真空の理解は、物質質量の 98% を創成するメカニズムを明らかにすることへと繋がっている。

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る。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、正確な陽子半径値決定は現代物理学の喫緊の課題となっている。

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すため、新ビームラインを含めた測定装置を建設（写真）、研究を開始している。



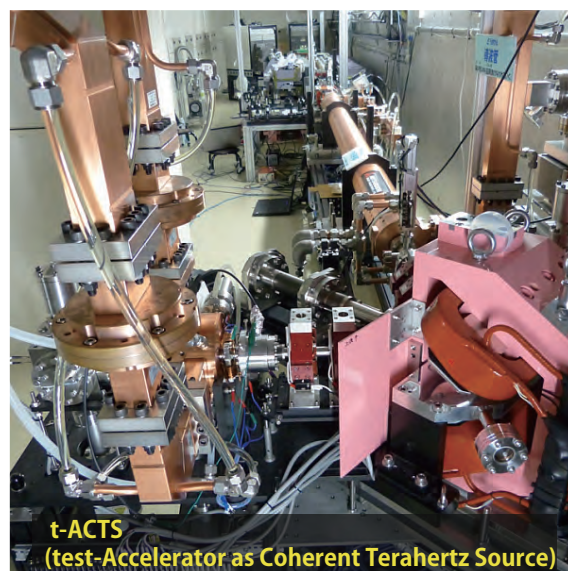
2) 短寿命なエキゾチック原子核の構造

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る。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、世界各地で鎬を削る研究が進んでいる。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あるが、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た。我々は、電子散乱による不安定核研究を推進するため、新たに発明した革新的実験技術（SCRIT:Self-Confining RI Target）に基づき世界初の不安定核専用の電子散乱施設を理化学研究所に建設した。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る。

加速器科学・ビーム物理分野

加速器科学・ビーム物理の分野では、電磁場と荷電粒子あるいは光子との相互作用と集団運動の動力学や、これを源とする様々な非線形物理現象を理解するために、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る。また本施設の電子リナックやシンクロトロン性能向上及び将来の加速器の高度化のための加速器科学の応用研究も行っている。線型加速器においては、主として高周波電子銃から生成される電子ビームにおける空間電荷効果による6次元位相空間の歪みや加速構造でのビーム自身の航跡場の影響による後続電子のエネルギー変移など、円型加速器において

は非線形磁場によるビームダイナミクスや不安定性等を研究している。この他、試験加速器（t-ACTS）において独自に開発した高周波電子銃を用いた超短パルス電子ビーム生成の研究や、これによるコヒーレントテラヘルツ光源の開発、共鳴波長より短い電子パルスを用いた新奇な自由電子レーザー（FEL）相互作用などの研究を行っている。



また他機関との共同研究としては、ImPACTプログラム（佐野 PM）において超小型 XFEL の実証に向けた研究や、理化学研究所 X 線 FEL グループと共に超高輝度電子ビーム生成の基礎研究を行っている。海外では、チェンマイ大学（タイ）や精華大学（台湾）などと熱陰極高周波電子銃の基礎研究およびレーザー逆コンプトン散乱による X 線生成研究などを進めている。

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る。電子光物理学研究センターの大強度電子線形加速器（電子・光子照射）をはじめ、東北大学所有の大型サイクロトロン（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 製造を行っている。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る。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る。

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

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

核放射線物理グループは、国内有数のサイクロトロン加速器を有し、サイクロトロンの多目的利用と放射性物質（RI）管理並びに短寿命・高レベル RI の利用促進を目的とするサイクロトロン・ラジオアイソトープセンターに所属しており、加速器と測定器の 2 研究部から構成される。

核放射線物理学は、核反応や不安定核の崩壊等によって放出される様々な放射線を計測・解析することによって、原子核の中での核子等の多彩な振舞い、即ち核構造や核反応、核子-核子相互作用等を実験的に究明するものである。本グループでは、更にこれらの研究に不可欠な加速器・測定器の開発研究も行っている。

加速器研究部で進行中のプロジェクトとしては、(1) 宇宙における元素合成に大きく影響する原子核の新しい励起モードの探索及び天体核反応の超精密測定、(2) 原子核におけるボース・アインシュタイン凝縮状態と考えられるアルファ・クラスター凝縮状態など、極限量子状態の生成・消滅機構の解明、(3) 多目的利用促進に向けた AVF サイクロトロン加速器及びイオン源の高度化、(4) 産学連携事業におけるビーム診断装置、測定機器の開発研究、を行っている。

測定器研究部では、物質優勢の宇宙はどのようにして生じたのか、この CP 非保存機構の

解明を目指し、「レーザー冷却不安定原子」を用いた基本対称性・相互作用の研究を進める。極端な原子（重い放射性元素等）と極端な量子状態（ボース・アインシュタイン凝縮等）を、大強度重イオンビームによる原子核反応と高強度レーザーによる原子冷却技術を駆使して生成し、微小な対称性破れのシグナル（電気双極子能率）を増幅してクォーク・レプトン間の相互作用の高感度探索を行う冷却不安定原子工場を建設する。特異な量子状態を用いて、物質創成から元素合成に至る極限量子の世界に迫る。

また一方で、基礎物理の実験的研究で開発された技術の医学応用として、粒子線治療や硼素中性子捕獲療法（BNCT）における高精度な照射技術、ビームプロファイル及び線量計測技術の開発を行なうと共に、医学・薬学系分野と連携し先進的な粒子線治療や BNCT の基礎研究も推進している。

さらに、核放射線物理学講座は、素粒子・核物理学並びに核理学講座との共同研究によってクローバー型ゲルマニウム検出器、高エネルギーガンマ線検出器、並びに中性子誘導核反応分析装置等の開発にも携わり、阪大核物理研究センター、理研仁科加速器センター等において全国的・国際的な共同研究も行っている。



加速器科学グループ

Accelerator Science Group

金正 倫計 教授（客員）

幅 淳二 教授（委嘱）*

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

当グループは、大強度陽子加速器、および加速器を用いた素粒子・原子核物理の研究を行う。

大強度陽子加速器の研究（金正倫計）

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ある。

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 段の加速器から成る。



図1：大強度陽子加速器施設（J-PARC）

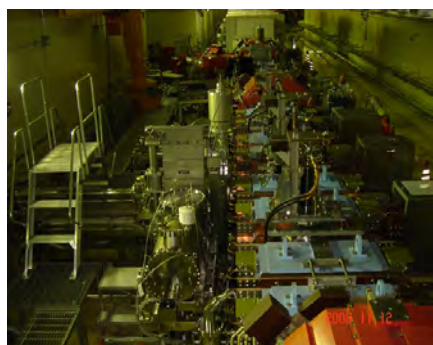


図2：3 GeV シンクロトロン入射部の写真。リニアックで 400 MeV まで加速された H^- ビームを H^+ ビームに変換（荷電変換入射と呼ぶ）し、入射することでビーム強度の増大を図る。

現在は、ビーム出力の目標値（RCS: 1MW、MR: 1MW 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る。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る。MR では、2021 年度には電源が増強される予定で、ビーム強度と安定性の圧倒的な向上が期待されている。

加速器における素粒子原子核実験システムの開発研究（幅淳二）

素粒子・原子核物理学実験は、かつて宇宙創生の瞬間におきた現象を、加速器によって地上で再現、観測分析して、宇宙の基本法則を探る実験物理学である。そのためには、高性能の加速器が必要なことはもちろん、高精度の観測・測定を可能とする実験装置が鍵となる。こうした加速器と測定装置の革新が、常に新しい物理学の地平を切り拓いてきたともいえよう。われわれは、そうした革新をもたらす先端的測定器システムの開発研究を行っている。

開発される技術は、また量子ビームをプローブとして物質・生命などを対象とする科学研究、さらには核医学における診断・治療の分野、非破壊検査などの産業利用にも大きな革新をもたらすものであり、そうした幅広い分野への応用を検討する事も重要な研究テーマとなる。

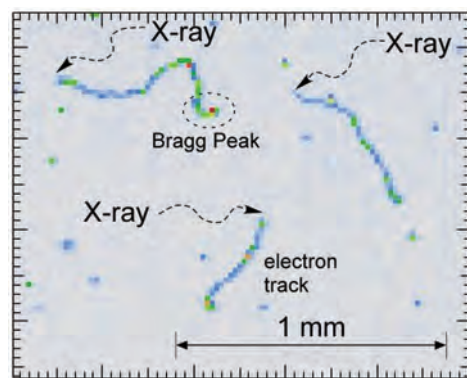


図3. シリコン結晶中でのコンプトン散乱電子を、先進LSI技術による微細ピクセル型粒子検出器 (SOI Pixel Sensor) により観測（視覚化）した画像。

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¹ 中山 耕輔 助教

相馬 清吾 准教授 (CSRN)¹ (¹AIMR を兼務)

<http://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る。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する。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る。現在進めている具体的な研究は、以下のとおりである。

- (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物性創発

さらに、国内外の放射光実験施設（高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory, 分子科学研究所 UVSOR, BESSY(独), 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る。

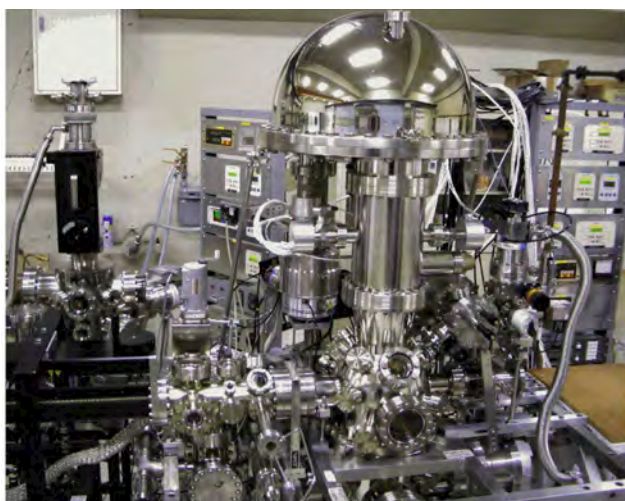


図1 東北大学に建設した世界最高水準のエネルギー分解能を有する ARPES 装置

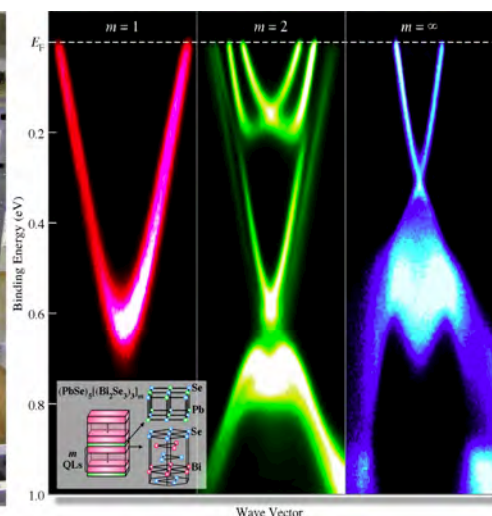


図2 角度分解光電子分光で決定したトポロジカル絶縁体超構造のバンド分散

極低温量子物理グループ

Low Temperature Quantum Physics Group

木村 憲彰 教授 壁谷典幸 助教

<http://www.vlt.phys.tohoku.ac.jp/> E-mail: kimura@mail.clts.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くる。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奇な現象解明の重要なツールとなっている。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る。特に、ドハース・ファンアルフェン (dHvA) 効果をはじめとするフェルミ面研究から、伝導電子の基底状態の新たな性質を導き出す研究を得意としている。

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ある。

- (1) 磁気量子臨界点とフェルミ面の相転移：磁気秩序温度が絶対零度まで落ち込む量子臨界点近傍では、量子ゆらぎによってフェルミ面の不安定化があらわになる。このような領域で発現する新奇な基底状態・相転移を探索し、量子臨界点における新しい物理概念の構築を目指す。
- (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する。
- (3) パリティの破れに起因したフェルミ面のスピントクスチャー：空間反転対称性の破れた金属ではフェルミ面のスピン縮退がとけ、スピントクスチャーが現れる。これらを dHvA 効果で検出することを目指す。
- (4) 希土類化合物における量子スピン系：スピンの非可換性が顕現化する舞台となる幾何学的フラストレーションに希土類元素を組み合わせることで、これまでにない新たな性質をもった量子スピン系の開拓を行う。

本研究グループには、これらの研究目的を実施するための各種試料育成装置から、極低温・強磁場・精密高圧にいたる種々の実験設備を有しており、また、常に世界最先端を目指す技術開発を行っている。さらに、本研究グループの特長や研究実績を生かして、国内外と活発に共同研究を行っている。



図1. タングステン坩堝の電子ビーム溶接。高蒸気圧・高融点化合物の単結晶育成を可能にする。

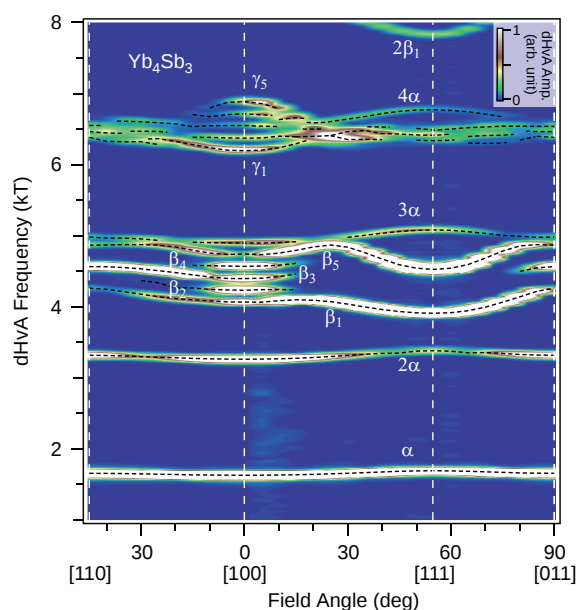


図2. 空間反転対称性の破れた物質における dHvA 周波数の角度依存性。スピン分裂したフェルミ面間の軌道交差現象をとらえている ($\beta_2 \sim \beta_4$)。

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 青山 拓也 助教

<http://web.tohoku.ac.jp/mqp/> e-mail: 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る。強相関電子系では、しばしば対称性の破れやトポロ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する。超伝導・スピン液体・量子ホール効果は、その代表例である。また、量子秩序からの素励起は、スピン波・位相欠陥・エニオンなど、一般に電子の個別励起とは全く異なるものになる。新奇な量子秩序を発見すること、量子秩序の秩序変数と素励起を解明することは、強相関電子系研究の中心課題である。

強相関電子系としては、有機化合物 (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るが、我々が研究対象としているのは遷移金属化合物 (d 電子系) である。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、が挙げられる。これらの特徴の存在により、高温超伝導 (銅酸化物・鉄ニクタイト)、エキゾチック超伝導 (ルテニウム酸化物・コバルト酸化物など)、巨大磁気抵抗効果 (マンガン酸化物など)、新奇スピン秩序 (銅酸化物・イリジウム酸化物など) を含む、新奇な強相関電子物性が劇的な形で発現する。

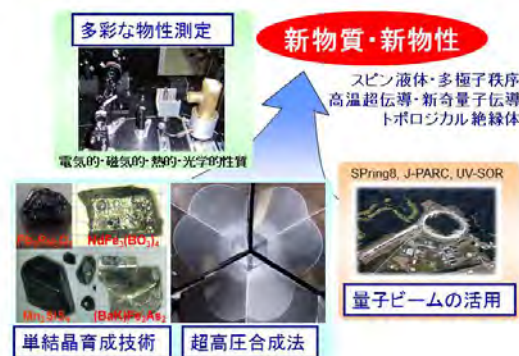


図 1 : 研究の概念図.

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ある。研究の柱に、「新奇な強相関電子物質の創製」を据えている。様々な固体化学的手法を駆使して、酸化物・窒化物・カルコゲナイド・ニクタイトを含む広範な遷移金属化合物の純良試料を育成している。また、超高压合成法を用いた新物質探索も行っている。こうして得たバルク試料に対し、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る。さらに、近年長足の進歩を遂げている共鳴 X 線散乱実験などの大型施設を利用した量子ビーム研究も積極的に推進し、微視的視点から電子状態を解明している。こうした物質合成を基盤に据えた総合的研究を通して、磁性・超伝導・トポロジカル秩序などの新奇な強相関量子物性を発見することを目指している。

現在は、以下のテーマに関する研究を集中的に進めている。

1. 鉄系超伝導体の強相関電子物性の研究および物質開発。
2. 奇パリティ多極子秩序系における量子物性の研究。
3. $5d$ 電子系におけるスピン軌道相互作用に起因する量子物性の研究。
4. 高压合成法による新物質・新超伝導体探索。
5. 共鳴 X 線散乱法による構造物性研究。

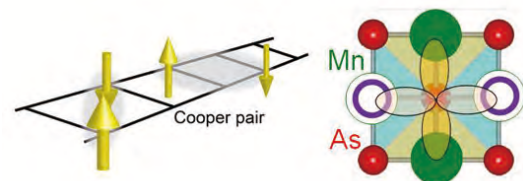


図 2 : 梯子格子における超伝導 (左) と磁気四極子秩序 (右) .

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

下谷 秀和 准教授

石井 祐太 助教

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

E-mail: wakabayashi@tohoku.ac.jp

物質の様々な性質は、その構造と直接・間接に結びついている。我々は物質の構造を詳細に見る事によって、多彩な物性の起源を微視的に解明する事を目指している。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く。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・散乱法であり、通常のX線構造解析に用いるブラッグ反射以外の情報に注目した構造研究を行うのが特徴である。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に関する研究を進めている。

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。そのため、様々な物質に対する研究を並行して進められる。具体的には、(1)2p電子系 分子性固体・有機デバイス、(2)3d電子系 遷移金属酸化物(結晶, 界面, 超薄膜), (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の研究を行っている。

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し、解析する。この例の場合、計算との比較によって、軌道自由度と結合したJahn-Tellerモードの歪みに起因する散乱である事がわかった。回折理論に基づく詳細な考察により、他の手法では計測不可能な軌道自由度の短距離相関の情報が引き出せる。



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るが、完全な計算を行うには計算負荷が高すぎるため、常に近似を行っている。ここに改良の余地があり、我々は従来不可能であった構造観測を実現するための解析手法の開発も行っている。ここ数年で行っているのは表面・界面の構造解析に情報科学を活用する手法開発である。得られた測定結果から、実際の試料の構造をベイズ推定で推測するソフトウェアを開発し、実用化した(図3)。これによって従来不可能であった界面構造の系統的な比較や、それに基づく物性の議論が行えるようになりつつある。

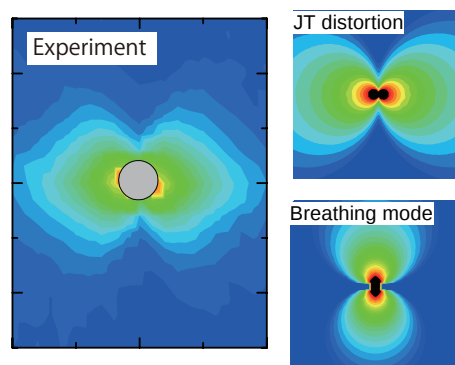


図2. $\text{Ba}_3\text{CuSb}_2\text{O}_9$ の軌道液体に対応する X 線散漫散乱強度分布。左：実験，右：異なるモードの歪みによるモデル計算強度。

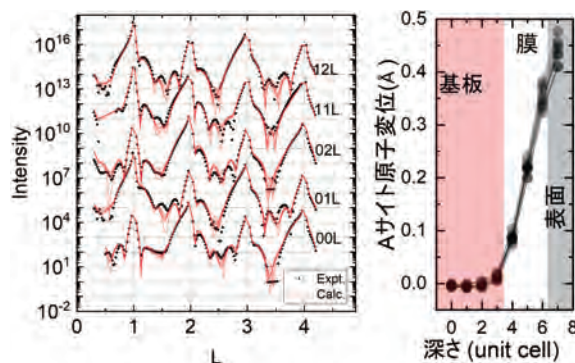


図3. モンテカルロ法による金属酸化物界面構造のベイズ推定の途中経過。(左) 散乱強度, (右) 金属サイトの変位量の深さ依存性。

低次元量子物理グループ

Low-Dimensional Quantum Physics Group

松井 広志 准教授

<http://ldp.phys.tohoku.ac.jp/> ; 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。プロトン伝導体は、水を含む系と、含まない系に分けられます。水を含む系として、親水性ナノチャンネルに内包された水ナノチューブ、及びタンパク質や多糖類のフィルムが挙げられます。通常廃棄される骨、皮、鱗、カニの甲羅などの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ています。次世代型の燃料電池電解質では、水を含まない系が望まれます。典型的な超プロトン伝導体について、プロトンの伝導・誘電ダイナミックスを研究しています。

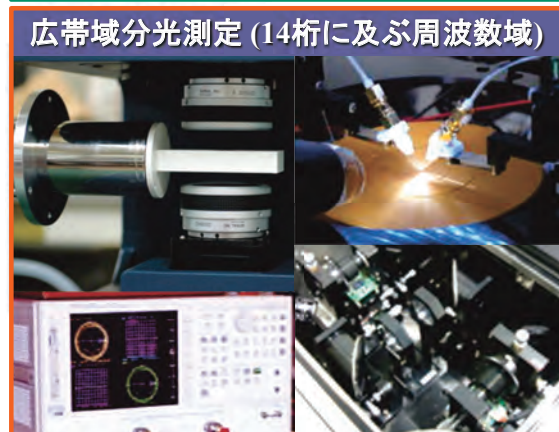
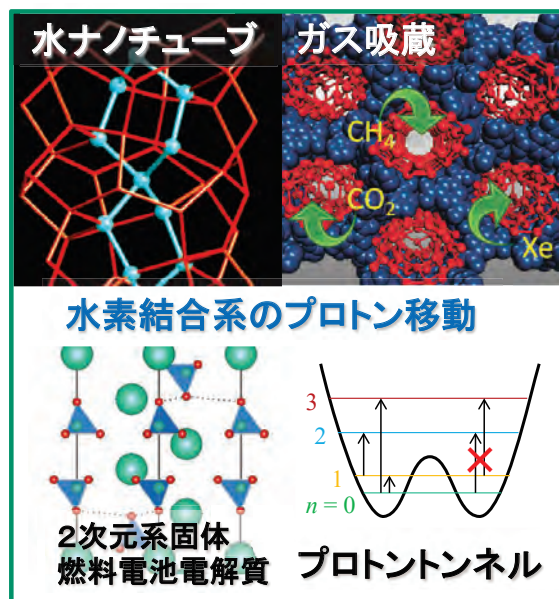
プロトンが関わるデバイス開発をプロトニクスと呼びます。生化学、医療、さらには、環境・エネルギー問題などとも密接に関連する学際的な研究テーマといえます。エレクトロニクスに換わるプロトニクスの進展に貢献しています。現在力を注いでいる課題として、以下の項目があります。

- (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。さらに、微小試料の顕微鏡赤外分光測定は、高輝度放射光施設 SPring-8 で行います。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！こうした電磁波は、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ックスを捉える最も強力な実験手段であり、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。



スピン構造物性グループ

Condensed Spin Matter Group

藤田 全基 教授

南部 雄亮 准教授

池田 陽一 助教

谷口 貴紀 助教

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

E-mail: qblab@imr.tohoku.ac.jp

はじめに

電子が凝集し互いに相互作用する強相関電子系は、物性物理学研究における一つの潮流として注目を集めています。この系では、電子の持つ自由度（電荷・スピン・軌道）が複雑に絡み合い、超伝導やスピン液体など新奇物性が現れます。その物性の解明には、結晶・磁気構造の決定だけでなく、格子やスピンなどの動的構造（ダイナミクス）に関する知見を得ることが重要です。本研究室では、広い空間・時間スケールでの測定が可能な中性子やミュオン、X線といった量子ビームを駆使した研究を展開しています。また、試料合成の環境を整え新奇物質の探索にも取り組んでいます。

研究内容

今年度は次のテーマを研究する予定です。

[1] 超伝導の発現機構

銅酸化物、鉄系化合物を対象に、結晶・磁気構造の決定と様々な条件下でのフォノン・磁気励起（マグノン）測定を行い、理論計算との比較を通じて超伝導機構の解明を目指します。

[2] スピントロニクス物質の微視的理解

現代のエレクトロニクスでは電荷からスピンの注目したデバイスにシフトしつつあります。スピン流を制御するスピントロニクス物質について、機構の解明を目指しています。

[3] 重い電子系の磁性と超伝導の関係

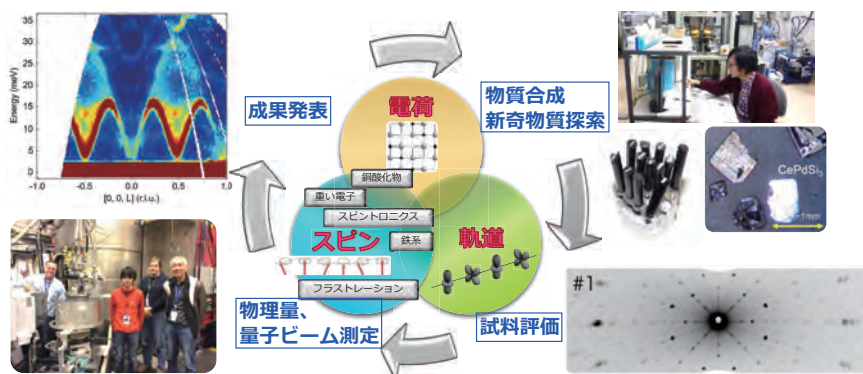
圧力下物性実験と中性子散乱実験等により、重い電子系化合物における超伝導と共存する磁性相と競合する磁性相の違いを明らかにします。

[4] 幾何学的フラストレーション系の磁性

フラストレーション系では最低エネルギーを持つスピンの向きが定まらず、スピンが秩序せず揺らぎ続ける場合があります。揺らぎの時空間情報を中性子散乱によって明らかにします。

本研究室の特徴

物性測定には良質の試料が必須で、自身で試料を合成できることは研究の強みです。新物質合成の成功から新しい研究が一気に広がることもあります。本研究室では、各種炉を取り揃え多様な合成方法を試すことができます。また、中性子散乱研究において国内最大級の専門研究室で、研究用原子炉 JRR-3 に三台中性子装置を所有し、大強度陽子加速器施設 J-PARC に世界最先端の偏極中性子散乱装置を運営しています。複数の中性子装置を独自に利用できる環境は世界的にも稀であり、学生も多くのビームタイムを用いて実験可能です。一方、物性解明には、自由度や時間スケールに適した特性の異なる量子ビームの利用が必要です。研究対象を多角的に捉えるために、中性子を基軸にミュオンや放射光 X 線も活用しています。これら量子ビーム実験は、国内の大型施設はもちろん海外施設にも出張して行います。そのため、共同研究も活発です。本研究室ではこれまで内部、外部を問わず多くの大学院生を受け入れてきました。歓迎会から追いコン、芋煮や旅行など親睦を図る行事もたくさん行っています。宝探的な試料合成を行い、強力な微視的実験手段である量子ビームを通して物理を明らかにしたいという方を歓迎します。



強磁場物性グループ

High Magnetic Field Condensed Matter Physics Group

野尻 浩之 教授 木俣 基 准教授 木原 工 助教 茂木 巖 助教

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

E-mail: nojiri@imr.tohoku.ac.jp / Tel: 022-215-2017

強磁場物性グループは、電子のもつ磁石—スピンの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新しい形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、強い電子相関による相転移の機構を明らかにします。また、強磁場を利用した未知粒子の探索などの共同研究も推進しています。

2. ナノトポロジーによる量子磁性

スピンナ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。

3. 量子コヒーレンス

ナノ分子スピン系を用いて量子計算の基礎となるスピンのコヒーレントな量子現象、特に量子ダイナミックスと呼ばれる時間発展を研究します。物理のなかで、時間に依存する物理現象の理解は、まだ未開拓で残されています。磁場というスピンに共役な外部場を駆使することで、実時間の物理の構築を目指しています。

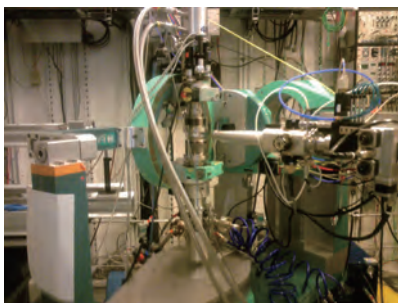
- 自分で世界1の装置を作ろう

研究ではユニークさが命です。このために、学生自らが新しい装置を作り、世界初の実験をする事を大事にしています。これを通して、本当の“研究力”が身に付きます。

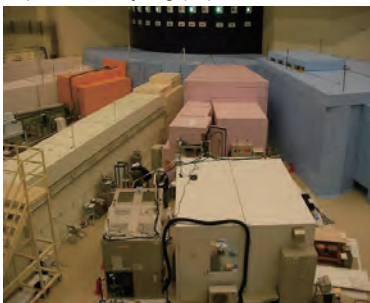
- 強相関物質から分子磁性体まで

研究の対象は、強相関酸化物、化学手法で作られる分子磁性体などあらゆる種類の磁性体です。どのような物質があればおもしろい物性が発現するか、どの様な実験でそれを観測するか、学生自らがデザインし考えながら研究を進めてゆきます。

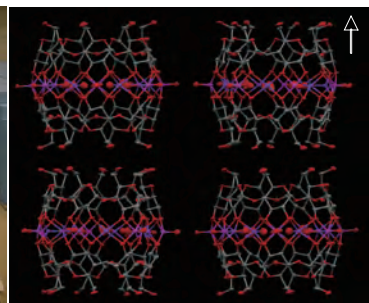
超強磁場X線装置(APSシカゴ)



超強磁場中性子回折装置
(J-PARC東海村)



スピンナノチューブ



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/>

E-mail: nojima@imr.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はなく、通常では存在し得ないような試料や電子状態を作り出すとともに、これを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、通常の方法では実現できない数の伝導キャリアを電場誘起し、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、電場に起因した空間反転対称性の破れが生み出す新しい超伝導機構や超伝導現象、強電場により実現可能な超伝導体キャリアの電子・ホール対称性に関わる物理現象に注目しています。

(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ること、もしくは通常のバルク（3 次元的な固体）で観測されにくかった現象がより鮮明になることがあります。銅酸化物や鉄系高温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。

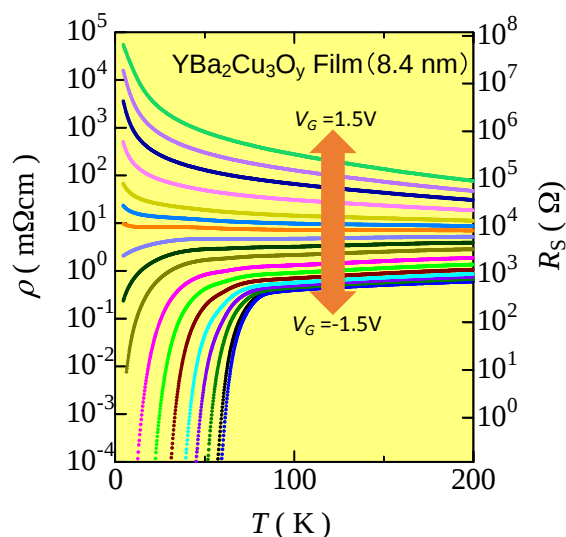
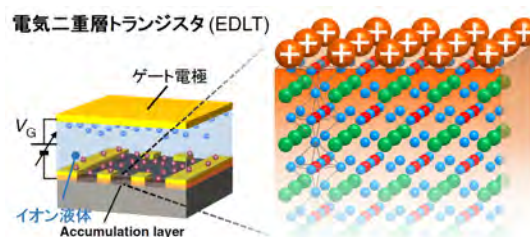
(3) 高温超伝導体の渦糸物理学

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では、大きな熱ゆらぎ

効果やマルチバンド（複数の超伝導ギャップ）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）が観測されます。磁気トルクや磁化、磁気抵抗という測定手段で、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。装置開発の経験は実験技術の取得や向上だけでなく、物理現象を広く理解する上でも大いに役立ちます。



（上）電気二重層トランジスタ（EDLT）構造の概念図と（下）EDLT 構造を用いた $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜の超伝導状態から絶縁体状態への連続制御の例。

分子物性物理グループ

Condensed Matter Physics in Molecular Materials Group

佐々木 孝彦 教授 井口 敏 准教授 古川 哲也 助教 杉浦 栞理 助教

http://cond-phys.imr.tohoku.ac.jp e-mail:takahiko@imr.tohoku.ac.jp tel:022-215-2025

本グループでは有機分子の集積によって構成されている分子性物質を研究対象とした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伝導体の特徴は、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。このような分子性有機物質に発現する金属-絶縁体相転移、超伝導、量子的スピン-電荷液体、電荷ガラス状態などの解明、新たな物性の発見、開拓を目指しています。

有機物質は、ナノサイズの分子の集積によって“やわらかい”と形容できる電荷-スピン-分子内-分子間格子が結合した複合的な自由度を持っています。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、有機物質の持つ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。

○ 分子性有機導体の精密電子相制御

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部分的な置換によるバンド幅の精密制御、冷却速度やエキス線照射などによる乱れの導入が無機物質系に比べて容易なため、多彩な物性の外部コントロールが可能です。私たちはエキ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。

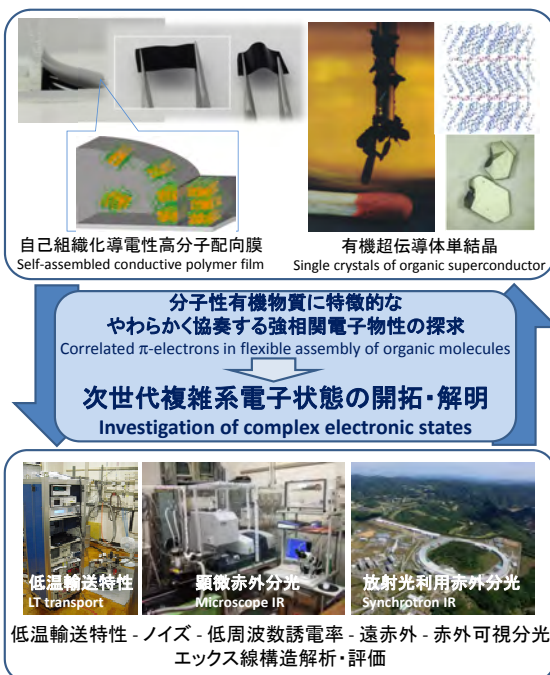
○ マルチスケールエネルギーランドスケープ描像が創出する新しいパイ電子物性

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 κ 型や θ 型と呼ばれる分子配列を持つBEDT-TTF系有機導体では配列した分子上の

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運動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複雑構造-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 強相関電子系分子性導体(有機超伝導体)、自己組織化導電性高分子膜の作製と各種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

薄膜ヘテロ界面物性グループ

Thin Films and Heterointerfaces Research Group

塚崎 敦 教授 藤原 宏平 准教授 塩貝 純一 助教 根岸 真通 助教

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

E-mail: mulabstf@imr.tohoku.ac.jp Tel: 022-215-2089

本研究グループでは、新たな機能を示す物質・界面の創出とその物性開拓に取り組んでいます。研究対象の一つであるトポロジカル絶縁体は、物質の表面や試料端に特殊な金属状態を有する物質群で、量子伝導やスピン、超伝導に関する物性が注目を集めています。当グループでは、超高真空成膜と先端デバイス加工を基盤技術に、トポロジカル絶縁体や層状超伝導体の高品質薄膜において、先駆的な実験研究を展開してきました。現在、これらの技術をディラック/ワイル電子系と呼ばれるトポロジカル物質群に適用し、量子異常ホール効果やトポロジカル超伝導などの量子輸送現象の検証を目指しています。さらに、それら機能現象の素子応用にも取り組んでいます。皆さんも、薄膜・界面のナノテクノロジーを使った研究を通して、新しい物理・機能を生み出すことに挑戦してみませんか。

(1) トポロジカル物質群の薄膜合成と素子機能の創出

真空成膜では、強い非平衡性を利用することで、バルク不安定な物質の薄膜合成と自在な界面形成を実現できます。当グループでは、分子線エビタキシー法、パルスレーザー堆積法、スパッタリング法などを駆使し、トポロジカル物質群を用いた機能界面の形成に取り組んでいます。例えば、トポロジカル絶縁体 $(\text{Bi,Sb})_2\text{Se}_3$ において (図 1(a))、混晶を用いたヘテロ構造と電界効果素子を組み合わせることで、本物質系初の量子異常ホール効果の観測に成功しています。また、異常ホール効果を示す Fe-Sn 強磁性合金薄膜を作製し、新型の磁気センサーとして応用できることを実証しています。今後、トポロジカル物質群のワイル半金属やキタエフ模型物質へと研究対象を広げ、トポロジカル量子計算の実現に資する新物質やスピントロニクス機能を生み出すことが我々の大きな目標です。

(2) ヘテロ界面および極薄膜における物性評価

異種物質を積層したときに現れる「ヘテロ界面」は、半導体に代表される各種素子機能の

源であると同時に、物性を人工的に制御できる魅力的な研究舞台です。また、ナノメートルスケールの極薄膜や人工超格子では、バルク物質とは全く異なる物性を示すことがあります。電気化学エッチング法で極薄膜化した FeSe において実証した高温超伝導はその一例です (図 1(b))。ヘテロ構造の設計自由度や膜厚をパラメータに、層状カルコゲナイドや酸化物超格子の界面で生じる特異な物性の発現メカニズムを解明しつつ、新たな機能素子へと展開することを目指しています。

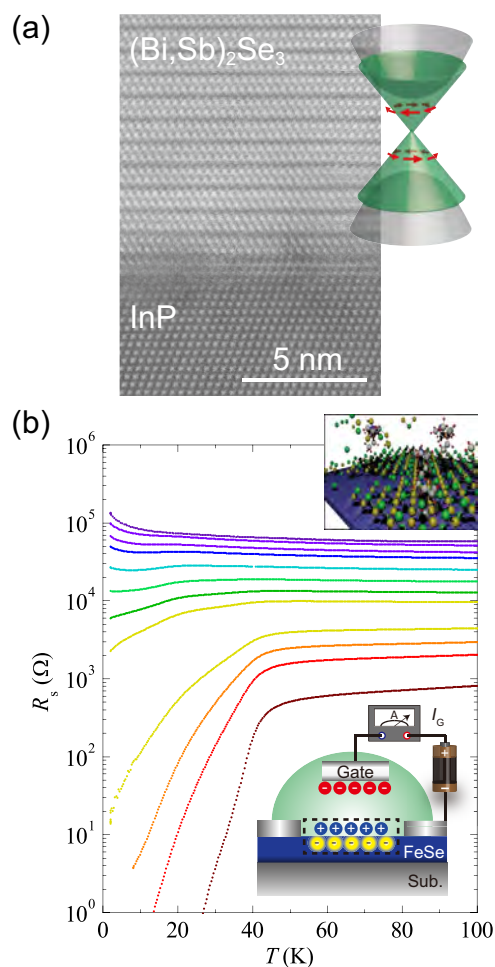


図 1. (a) トポロジカル絶縁体薄膜と電子状態。(b) FeSe 極薄膜における電界誘起超伝導とデバイス構造を用いた電気化学エッチング。

強相関電子物理学グループ

Strongly Correlated Electron Physics Group

池本 夕佳 教授 (客員)¹ 解良 聡 教授 (委嘱)² 藤森 伸一 教授 (客員)³

¹ikemoto@spring8.or.jp ²kera@ims.ac.jp ³fujimori@spring8.or.jp

強相関電子物理学グループでは国内の最先端研究施設の優れた環境のもとで強相関電子物性の研究教育を行っている。各教員の研究テーマは以下のとおりである。

藤森伸一：強相関電子系の中でも、特に希土類・アクチノイド化合物は非通常型超伝導や複雑な磁性を示しており、基礎物性物理学において重要な研究対象となっている。本研究室では、世界トップクラスの性能を持つ大型放射光施設 SPring-8 の軟 X 線ビームライン BL23SU (左図) に設置した光電子分光装置 (右図) や XMCD 装置などを利用することにより、強相関希土類およびアクチノイド化合物に対する先端的な分光研究を行う。電子状態や磁性状態を明らかにすることによって、その物性発現機構をミクロな立場から解明することを目指す。



軟 X 線ビームライン SPring-8 BL23SU (左図) および光電子分光装置 (右図)

池本夕佳：大型放射光施設 SPring-8 の赤外物性ビームライン BL43IR を利用して、赤外線領域の放射光を利用した新たな分光装置の開発と、強相関物質などの分光測定を行っている。放射光は X 線から赤外線まで広いエネルギー領域の光をカバーする。物性物理はもとより、基礎科学から産業応用に至る多様な分野で利用され、今や物質科学研究に必要不可欠な光源である。SPring-8 は世界最高の加速エネルギーを持つ放射光施設で、赤外線領域は高輝度・広帯域特性が特徴である。これを活かして、BL43IR では近赤外～遠赤外の広帯域顕微分光測定を主として行なっている。以下にビームラインの写真を示す。試料環境として、

磁場・圧力・温度・延伸・加湿などの様々な条件で顕微分光測定を行うことができる。特に近年は高磁場や湿度制御環境における顕微分光装置開発に力を入れている。また、赤外近接場分光装置開発も行っている。



SPring-8 BL43IR

解良聡：有機化合物の中には強相関電子系の特徴を示すものが多くある。分子を量子構造体とする局在電子系のなせる業である。しかし分子間の相互作用は緩く結合した van der Waals 力によって固体を形成するものが多く、その機能・物性を司る本質は、分子に局在化した電子と多彩な階層フォノン (集団的格子振動・局所的分子振動) が担っている。弱い相互作用の影響は狭いエネルギー領域で複数現象が競合する形で現れるため、計測実験自身の困難さに加え、本質的に外的環境因子で容易に変化する「観測しにくい」状態である。有機化合物を材料として応用展開しようとする、しばしば固体物理学で培われてきた学理が適用できない状況に遭遇する。こうした電子とフォノンが協奏的にふるまう物質系の電子状態や振動状態を精密に計測することで、複雑な分子集合系の特徴を露わにし、「輸送する電荷・変換される電荷の姿」を量子論的に理解することを目的として研究を進めている。



UVSOR 放射光施設：最先端の波数分解光電子顕微鏡が導入された

ソフトマター・生物物理グループ

Soft Matter and Biophysics Group

今井 正幸 教授 佐久間 由香 講師 大場 哲彦 助教

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

生命は高分子や両親媒性分子などの物質からできていますが、代謝・増殖など、通常の物質にはない特徴を持っています。このような生命が持つ様々な特性を物性物理を基本にして明らかにすることが当研究室の目的です。現在は以下のテーマで研究を進めています。

1) 生命のような自律的・持続的な自己複製システムの構築

生命のように膜で取り囲まれた領域（個体）を確保し、自らの情報をコードした情報高分子に基づいて外部から取り込んだ原料から自らを構成する物質群を合成し（代謝）、それらを使って自らを再生産し（自己生産）、そして再生産された子システムも親システムと同様に再び自己生産する性質を備える（遺伝）システムを自己複製システムと呼びます。このような自己複製システムを生体分子とは異なるできるだけ単純な分子群を用いて構築することにより自己複製システムを支える物理を明らかにする研究を進めています。

また、これらの知見を元に原始地球に存在した最も単純な生体分子（脂肪酸・アミノ酸・ペプチド・ヌクレオシド・ポリヌクレオシドなど）を用いてプロトセルと呼ばれる原始生命体を再構築し原始の地球でどのように生命が誕生したのかを明らかにする研究も進めています。

2) “生きている状態”の計測

生命システムは、自らを構成している物質群は同じであるのに、生きた状態（非平衡状態）と死んだ状態では全く異なる性質を示します。我々は、この生きた状態と死んだ状態を物性として計測することにより生きた状態の特性を明らかにする研究を進めています。

例えば、生体膜における代謝などの生体機能は機能性分子の拡散を通して制御されるため、膜の流動性はその機能発現を支配する重要な因子です。そこで、モデル生体膜において流動性の指標である膜粘度を調べる研究を行って

います。脂質分子から成る単純なモデル生体膜から、膜の不均一性や非対称性などの条件を段階的に実際の生体膜に近づけ、生体膜の組成や構造に対する系統的な研究からその粘度を支配する要因の解明を試みています。さらに、生きた状態の細胞では生体膜は常に細胞質などから力を受けた非平衡状態にあり、平衡状態の膜粘度とは大きく異なることが予想されます。そこで最終的には“生きている状態”の生体膜の粘度測定を行い、細胞の流動特性を支配する要因の解明を目指しています。

3) 多細胞生物の形態形成機構の解明と病理診断への応用

生命は単細胞生物から多細胞生物へと進化を遂げ、その過程で細胞集団が様々な形態を作り上げてきました。そのような細胞集団の形態形成を、人工細胞を用いた実験と力学モデルを用いたシミュレーションの両面から明らかにする研究を進めています。その結果を元に、多細胞生物の胚発生を支配する力学モデルを明らかにしています。一方で、このような複数の細胞からなる組織の形態は病理診断の上でも非常に重要であることから、我々の構築した力学モデルをベースにがん細胞の特徴的な形態を支配する要因を解明し、病理診断への応用を目指しています。



我々が開発したマイクロメートルスケールのモデル生体膜の粘度を計測するシステム。この方法により生きている状態の細胞の膜粘度を計測する。

光物性物理グループ

Solid State Photophysics Group

石原 照也 教授

吉澤 雅幸 教授

富田 知志 准教授（高教機構）

松原 正和 准教授

大野 誠吾 助教

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

光物性物理は固体物理学の一分野で、光と物質との相互作用に関する物理現象を研究対象としています。本研究室では特徴のある構造を持った物質系を対象に光をあてて、構造に起因した新奇な物理現象の発見や機能の開拓を目指しています。

1) フォトニック結晶とメタマテリアル

物質を人工的にデザインしてうまく周期的に配列すると、自然界に存在する物質にはあり得ない負の屈折率などの光学特性を持つ物質を作り出すことが可能になります。構造の周期が光の波長よりも十分に小さく有効媒質とみなせる場合をメタマテリアル、波長程度で回折が生じる場合をフォトニック結晶と呼びます。近年の電子線描画装置などを用いた微細加工技術の発展により、このような構造をナノスケールでかなり自由に作製することができるようになってきました。

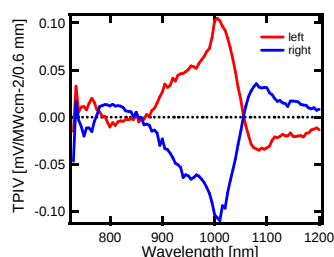
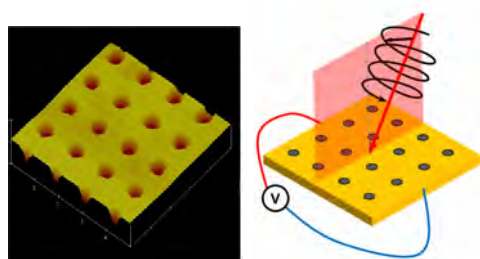
我々の研究グループでは光と物質の相互作用を人工的にデザインできる系としてこれらに注目し、試料の作製・レーザーなどを用いた光学測定・数値計算の3本立てで新しい研究分

野を開拓しています。特に、非線形光学応答、新奇な磁気光学応答、近接場光学応答などの開拓や、スピン流の光制御の実現、トポロジカルな性質の解明に重点をおき、国内外の研究者と協力しながら研究を進めています。

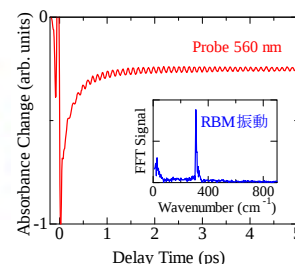
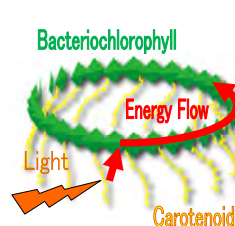
2) 有機共役 π 電子系の非線形分光

共役 π 電子をもつ有機物質系には一次元や二次元の特徴的構造をもつものがあり、光エレクトロニクス高機能性材料への応用が期待されています。例えば、光合成系の光捕集色素蛋白複合体（光アンテナ）はナノサイズの環状構造をしています。光エネルギーはナノ構造中の光アンテナ分子に吸収され、フェムト秒（ 10^{-15} 秒）からピコ秒（ 10^{-12} 秒）の時間で反応中心へと高効率に運ばれます。この励起状態ダイナミクスを研究することで人工の光合成系を含めた新たな光機能性材料の開発を目指しています。また、円筒形の共役 π 電子系をもつカーボンナノチューブについても、その特徴的な光学応答や振動特性の解明を行っています。

非線形光学効果を用いた新分光法の開発も進めています。フェムト秒誘導ラマン分光では、時間と周波数の不確定性原理を回避した世界最高性能の装置開発に成功しています。多色マルチ励起光による非線形励起や時間と空間を自在に制御した光パルスの生成も行っています。これらの方法を駆使して従来の分光法ではわからない物性の本質を明らかにし、光によって物質中にまったく新しい状態を作り出す物性制御に挑んでいます。



作製した金属フォトニック結晶の原子間力顕微鏡イメージ（上左）と光起電力測定配置図（上右）。円偏光励起光起電力スペクトル（下）。円偏光の向きによって逆向きの起電力が発生する。



光合成系光アンテナ中のエネルギー移動（左）とカーボンナノチューブに生成されたコヒーレント振動（右）。

超高速分光グループ

Ultrafast Spectroscopy Group

岩井 伸一郎 教授 伊藤 弘毅 助教 川上 洋平 助教

<http://femto.phys.tohoku.ac.jp/> E-mail: 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。青色 LED、超短パルスレーザー、光周波数コム、テラヘルツ光など最先端フォトニクスは、物質中の電流やスピンの配列を自在に操作する、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）や高次高調波発生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。

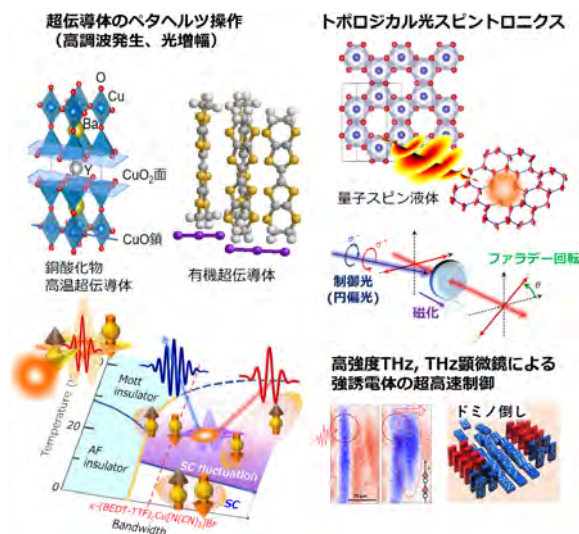


図1. 量子多体物質における光強電場効果とアト秒光機能の開拓

(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 fs）を開発し、「光の超強電場が電子を非線形駆動する」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明らかにします。また、可視～近赤外光に比べて、遥かに低エネルギーの高強度 THz 光を励起光として量子多体物質の操作を行います。

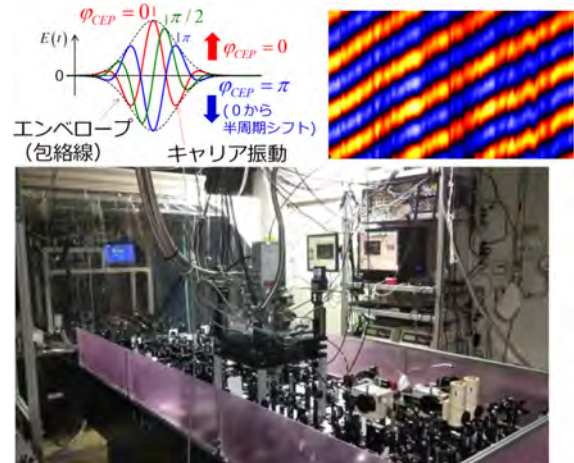


図2. 極短パルス光源を用いた超高時間分解測定装置と光電場のキャリアエンベロープ位相制御

量子ダイナミクスグループ

Quantum Dynamics Group

遊佐 剛 教授

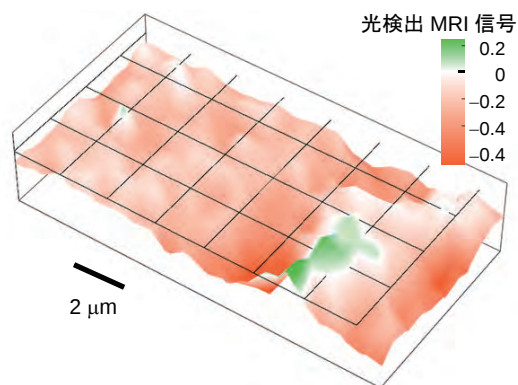
橋本 克之 助教

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

当研究室は2021年4月から始まった新しい研究室です。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。私たちはこのようなナノテクノロジー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することで、試料に存在する電子の電荷やスピン、ホール、励起子、核スピンといった粒子や準粒子が量子力学によって織りなす物理を研究しています。このような物理現象は物性だけでなく基礎物理学の面から見ても意義があります。私たちは、国内外の材料系の研究者や物性実験、物性理論、素粒子・宇宙理論の研究者といった幅広いバックグラウンドの方々と共同研究をしながら、下記の示すような研究を中心に、新しい物理を探索していこうと考えています。

★ ナノスケールの核磁気共鳴 (NMR) や磁気イメージング (MRI) に関する研究

病院等で利用されている磁気イメージング法 (MRI) は、核スピンの共鳴周波数や緩和時間などの物理量の空間的な差異を可視化し、診断などに用いる測定法です。私たちの研究室では通常のNMR/MRI異なる手法でナノスケールのNMR/MRIに関する研究を行っています。



光検出 MRI によるヒ素 (As^{75}) の核スピン偏極の空間分布

★ 分数量子ホール状態に関する研究

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

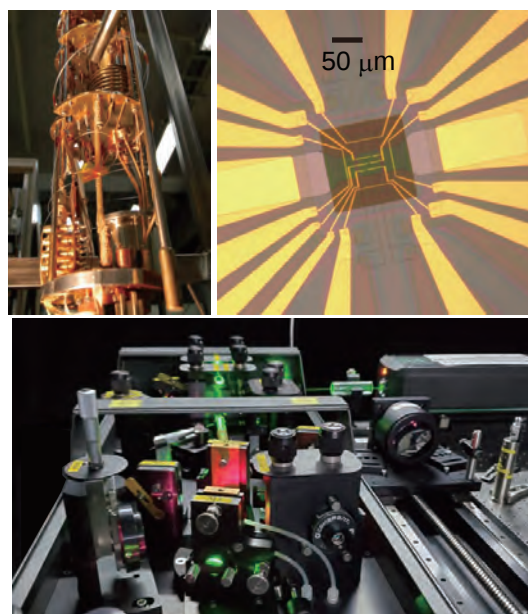
あるだけでなく、エニオンと呼ばれるボゾンでもフェルミオンでもない統計が期待されるきわめて特異な系です。

★ 量子情報/アナロジーとして量子宇宙の研究

最近、量子計算に関するニュースがホットになっています。私たちは主に場の理論的なアプローチ (連続状態) の量子情報に関して、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を行っています。量子ホール系のエッジ状態は場の理論でよく記述でき、場の理論のトイモデルとしても興味深い対象です。エッジ状態を量子宇宙と見立て、アナロジーとして量子宇宙の実験研究も進めています。

★ 新奇材料に関する研究

折りたたむためのスマホのようにフレキシブルなデバイスや透明なデバイスなど新しいデバイス応用に向け、新奇材料の研究が世界中で進められています。特に国内外の研究グループと共同で遷移金属カルコゲナイドやグラフェンといった新奇材料に関する研究を行っています。



(左上) 数十ミリケルビンを実現する極低温強磁場装置 (右上) 半導体ナノデバイスの一例 (下) 光学測定系

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 大野 裕 准教授 新居 陽一 助教 増田 英俊 助教

E-mail: onose@imr.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、スピンが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、スピンが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ということです。例えば、図1に示すようなスピンが面内で回転する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が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。

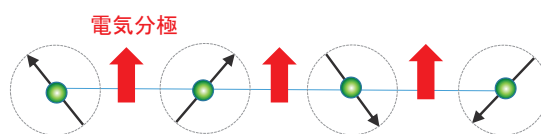


図1. 強誘電性を示す、らせん磁気構造

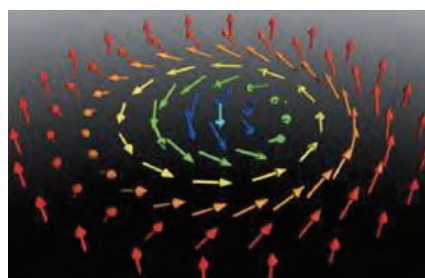


図2. トポロジカル磁気構造体スキルミオン

結晶成長物理グループ

Crystal Growth Physics Group

藤原 航三 教授 森戸 春彦 准教授 前田 健作 助教

<http://www.xtalphys.imr.tohoku.ac.jp/> E-mail: kozy@imr.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
- フラックス法による新物質・新材料創製
- 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。

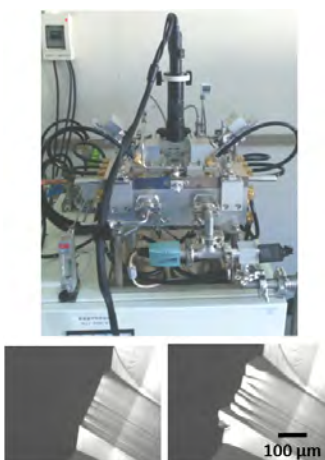
本グループでは、独自に“その場”観察装置を開発し、Si の融液成長メカニズムの解明と制御に関する研究を展開しています。本技術は、半導体材料だけでなく、各種化合物材料や金属材料など高融点材料の固液界面の観察にも適用できるため、融液成長の総合理解を目指して研究を発展させていきます。

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。

金属フラックス法による新物質の創製

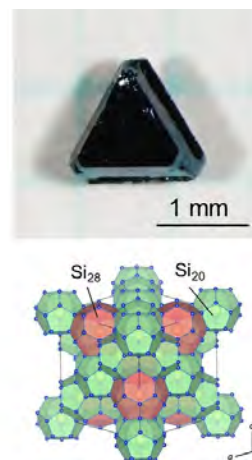
金属フラックスを用いた独自の結晶成長プロセスにより、新機能や高性能を示す新しい結晶材料の創製を目指しています。



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



フラックス法により作製した Si クラスレート

表面構造物性グループ

Surface Structure Physics Group

虻川 匡司 教授 小川 修一 助教

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

email: abukawa@tohoku.ac.jp, tel:022-217-5364

摩擦、親水性、撥水性、錆び、接着、吸着、電池電極、固体触媒など、身の回りの多くのものに表面の物性が関わっているが、原子レベルでの理解は進んでいない。表面物理研究の究極の目標は、表面に関連するミクロ、マクロな現象を原子レベルから体系立てて理解することである。

原子の配列が突然途切れる表面は、結晶内部（バルク）とは異なる対称性を有し、一様な固体内部では実現しないような組成や特異な構造が実現することが知られている。そのため表面・界面には特有の物性や新たな機能が期待される。本グループでは、様々な機能を持った表面・界面の創製を目指して、表面・界面を原子レベルで理解するために以下のような研究を行っている。

新しい表面構造解析法の開発

表面の構造を原子レベルで理解するために、表面構造を3次元的に可視化できる構造解析法の開発を行っている。開発したワイゼンベルグ反射高速電子回折法は、広い3次元逆格子空間をわずか20分で測定でき、しかも表面構造を完全な形で3次元的に決定できる独自の優れた手法である。これらの独自手法を使って未知の表面構造を決定する。

表面ナノドメインの理解

現実の表面は様々な小さな表面の集合体である。光電子顕微鏡 (PEEM) と走査電子顕微鏡 (SEM) を用いて不均一な物質表面をナノレベルの分解能で計測する。PEEMでは、ナノドメインで起こる化学反応プロセスの観測が可能であり、電子回折法と組み合わせたSEMではナノ領域の構造解析が可能である。

機能を持った表面・界面の創成と理解

表面を原子レベルで制御することで、例えば貴金属に代わる優れた触媒の実現など、新たな

機能をもつ表面の実現を目指している。また、優れた物理、化学、電気特性を示すグラフェン、h-BN、MoS₂などの2次元原子層物質の研究も行っている。例えば、グラフェンに酸素分子を衝突させて、放射光を使った光電子分光を行い、ガスバリア特性の研究を行った。その結果、グラフェンの欠陥付近で誘起される表面反応における分子ダイナミクスが、ガス分子の通り抜けに重要な役割を果たしていることが分かった。

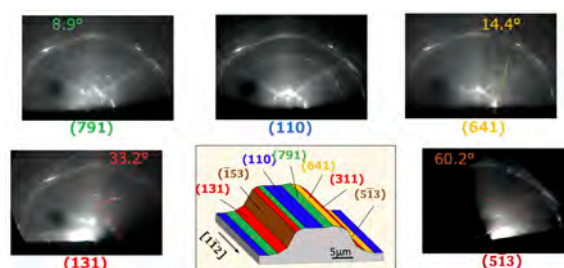


図1. 様々な面で囲まれたSi 3次元マイクロ構造のSEM- μ -RHEED観察.

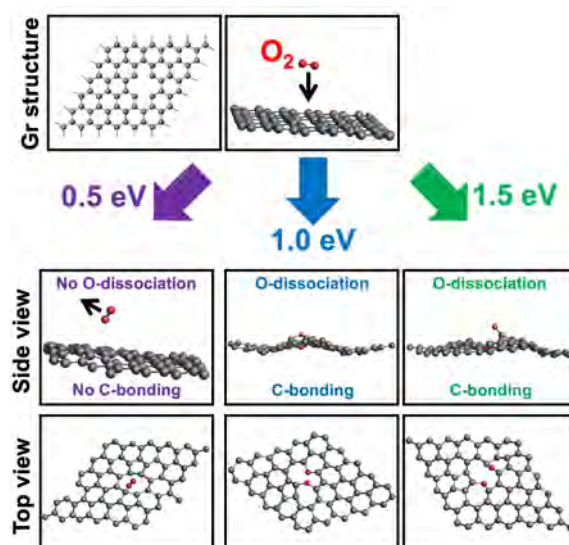


図2. グラフェンの欠陥部分に衝突する酸素分子の反応の様子.

スピン量子物性グループ

Quantum Spin Physics Group

佐藤 卓 教授 奥山 大輔 助教 那波 和宏 助教

http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/sato_tj/

E-mail: 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 $0.01\text{--}1000\text{ meV}$ ）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。特に、近年稼働を始めた J-PARC パルス中性子分光器では、広い運動量・エネルギー空間の散乱関数を一度に測定する事が出来るため、スピン揺動の全体像の把握に大きな威力を発揮するものと期待されます。

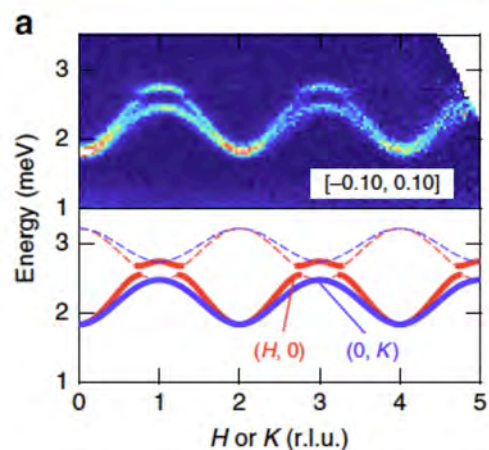
本研究室では、スピンダイナミクス測定に対する唯一無二の手段である中性子非弾性散乱を駆使して以下のような研究を行っています。

- ・ 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ロ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 $\text{Ba}_2\text{CuSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$ におけるトポロジカルなトリプロン励起の測定結果を図に示します。トリプロンとは非磁性シングレット基底状態からの第一励起状態（トリプロン）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 $\text{Ba}_2\text{CuSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$ のトリプロン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、トリプロン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ロン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ロジカルな性質な発現として大きな興味を持たれます。



$\text{Ba}_2\text{CuSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$ におけるトリプロン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

寺内 正己 教授 佐藤 庸平 准教授 森川大輔 助教

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

email: masami.terauchi.c4 @ tohoku.ac.jp, tel:022-217-5372

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ター ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$) 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 $\sim$ 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、

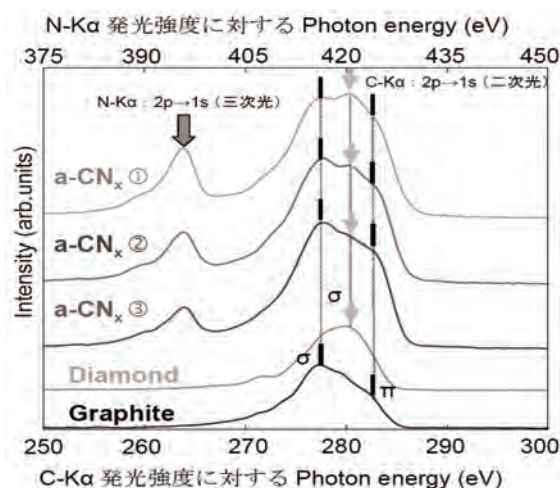
- ・収束電子回折 (CBED) 法による結晶構造の空間群決定・電荷密度分布の解析、
- ・電子エネルギー損失分光 (EELS) 法による光学物性の解明・伝導帯状態密度分布の解明、
- ・軟 X 線発光分光 (SXES) 法による価電子帯状態密度分布の解明、

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。

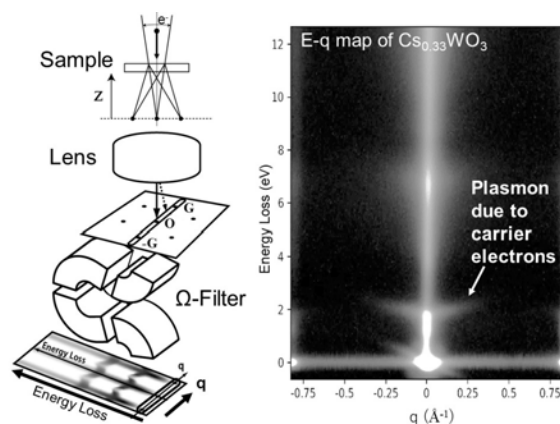
現在、次のようなテーマについて研究を行っています。

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. 角度分解 EELS によるプラズモン振動の運動量依存性
4. 強相関電子系物質 (マルチフェロイック物質など) の構造・電子状態
5. 構造相転移 (強誘電体など) と静電ポテンシャル分布



軟 X 線発光分光によるアモルファス窒化カーボン a-CN $_x$ の電子状態



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

木村 宏之 教授 坂倉 輝俊 助教 山本 孟 助教

<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新規物質探索と構造物性研究。

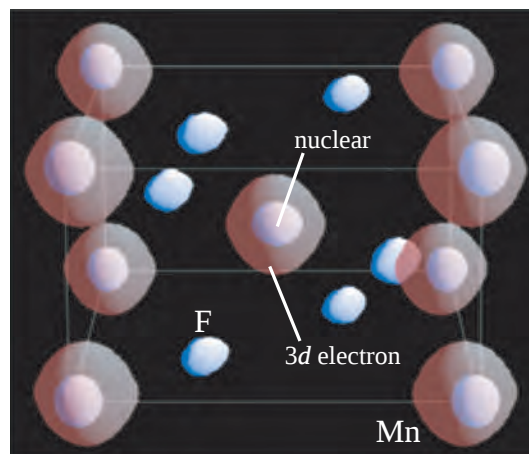


図. 単結晶を用いた精密結晶・磁気構造解析により得られた反強磁性体 MnF_2 の原子核密度分布（青丸）と Mn^{2+} スピン密度分布（赤丸）。赤丸は、 $3d$ 軌道を占有している電子スピンの空間分布を表している。

量子機能計測グループ

Quantum Measurement and Functional Sensing Group

足立 伸一 教授（客員）¹ 大谷 知行 教授（客員）² 鶴山 竜昭 教授（客員）³

¹ <https://research.kek.jp/people/adachis>

² <https://thzing.riken.jp>

³ <https://www.kitano-hp.or.jp/kenkyu>

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、時間分解 X 線計測による物質構造の光誘起ダイナミクス研究、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研究、及び、病理組織・細胞の画像診断を活用した生物物理学研究を進めています。

1 つめの研究テーマは、放射光 X 線を利用した時間分解 X 線計測法による物質構造の光誘起ダイナミクスに関する研究です。光により過渡的に現れる励起状態は、気相や液相中の孤立分子では、一重項や三重項状態もしくは電荷移動状態などとしてしばしば観測されます。また、固相の強相関係物質では協力現象を伴う光誘起相転移が観測される事例がよく知られています。これらの光誘起現象では電子励起を端緒として物質構造が逐次的に変化していると考えられており、この光励起過程の総合的理解のために、過渡的な物質構造変化を実験的に捉えることが重要となります。本テーマでは、放射光 X 線のパルス性を活かした時間分解 X 線構造計測手法の開発とその応用研究を行っています。この研究は、高エネルギー加速器研究機構（茨城県つくば市）にて進められます。

2 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に関する研究です。テラヘルツ帯は、電磁波の光と波の両方の性質が融合して現れる周波数帯であり、基礎的な研究のみならず、ソフトマテリアルに対する物質透過性を活用した非破壊検査、この帯域ならではの特徴的な吸

収スペクトル構造を用いた物性診断、さらには、近未来の超高速無線通信のキャリアとしての活用も期待されています。本テーマでは、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）偏光観測のための GroundBIRD 望遠鏡と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、大きな分子の骨格振動や分子間振動に起因する吸収スペクトルをプローブとした分光学的研究、及び、テラヘルツ波照射による高分子やたんぱく質の構造制御に関する研究等を行っています。この研究は、理化学研究所仙台支所（仙台市青葉区）にて進められます。

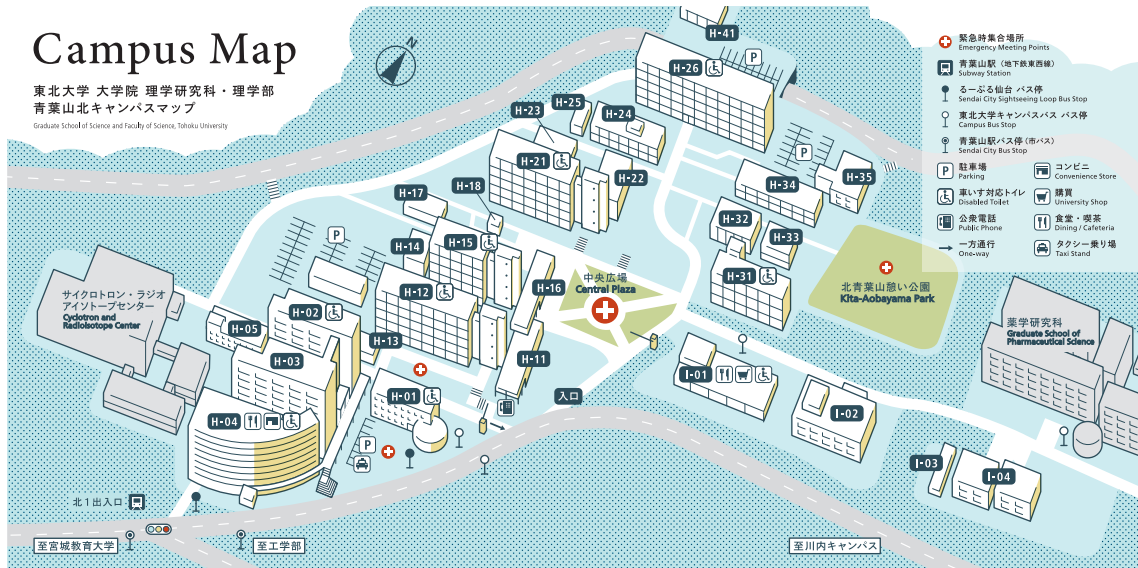
3 つ目の研究テーマは、細胞診断分野への物理学応用を主テーマとします。病理学は、内視鏡などによる採取細胞や組織の顕微鏡観察や人工改変した動物遺伝子の顕微鏡観察による画像分析で機能解析を行う医学分野です。本テーマでは、原子間力顕微鏡（AFM）によるウイルス遺伝子タンパク質複合体の同定、マトリックス支援レーザー脱離イオン化法（MALDI-TOF MS）を応用したペプチドのイオン化による質量分析イメージング技術の開発やがん細胞シグナルの分析などを行い、診断・治療方開発への応用を目指します。この研究は、田附興風会医学研究所北野病院（大阪市北区）との間でオンラインまたは東北大学にて進められます。



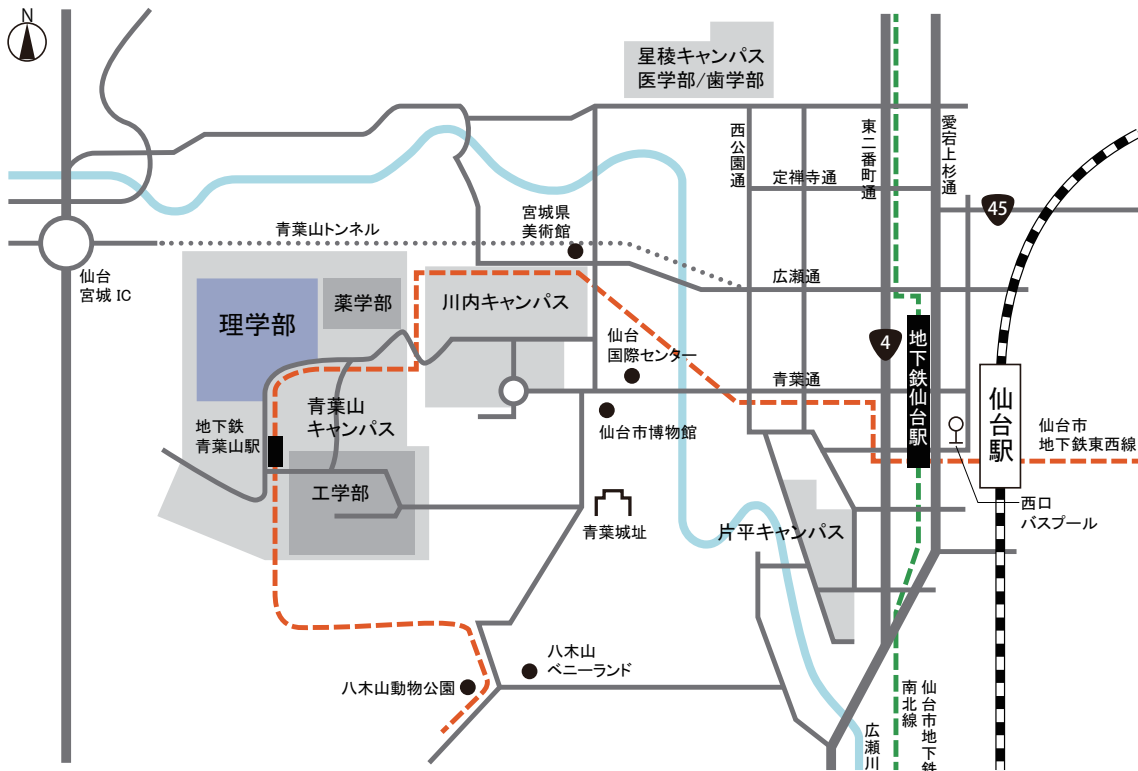
CMB 偏光観測望遠鏡 GroundBIRD（スペイン）

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 物理学研究棟
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 高温高圧実験棟
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 生物学系学生実験棟
Biology Students Laboratories | 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 Lecture 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 物理学講義棟
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 機器開発研修棟
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：

最近の超電導量子コンピュータでも利用されている希釈冷凍機と、測定に利用する半導体ナノデバイスの写真(右下)。試料の温度を 20 ミリケルビン (-273.13°C) まで冷却でき、強磁場 (14 T) を印加しながら、光学顕微測定や高速電子輸送測定、核磁気共鳴 (NMR)、光検出磁気イメージング (MRI)、超高速分光測定などさまざまな測定が可能である。右下は超高純度半導体ウェハーに、電子ビーム描画、フォトリソグラフィ、エッチング、金属蒸着などのプロセスを施して作製したナノデバイスで、このデバイスの中にある電子、ホール、励起子、核スピンといった粒子、準粒子のダイナミクスを明らかにすることで新しい物理を研究している。

東北大学大学院理学研究科物理学専攻 案内

発行 2021 年 4 月

編集 物理学専攻 広報・パンフレット委員会

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 kyomu@jimu.phys.tohoku.ac.jp

Web ページ <http://www.phys.tohoku.ac.jp/>
