



東北大学大学院 理学研究科 物理学専攻案内 2019

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。

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、物理学専攻事務室、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: 2017 国内 2 位、2018 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 160 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。自己推薦入試についての詳細は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物理系専攻事務室教務係

〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3

電話：022-795-6494

E-mail: kyomu@jimu.phys.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) 2021 年 3 月末までに定年となる教員 (* 印) は、2020 年度入学者の指導教員にはなれない。
また 2020 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 ひかさ けんいち 日笠 健一 やまぐち まさひろ 山口 昌弘 いしかわ ひろし 石川 洋 すみの ゆきなり 隅野 行成 よねくら かずや 米倉 和也 わたむら さとし 綿村 哲 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 よこざき のりみ 横崎 統三	教授 教授 教授 准教授 准教授 准教授 准教授 * 助教 ¹ 助教 助教 助教	12
		原子核理論 Nuclear Theory Group	さ さ き しょういち 佐々木 勝一 はぎの こういち 萩野 浩一 えんどう しんぺい 遠藤 晋平 お の あきら 小野 章 たにむら ゆうすけ 谷村 雄介 まるやま まさひろ 丸山 政弘	准教授 准教授 助教 ¹ 助教 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	いしはら すみお 石原 純夫 教授 かわかつ としひろ 川勝 年洋 教授 さいとう りいちろう 齋藤 理一郎 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 しばた なおかず 柴田 尚和 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 アフ マド リドワン Ahmad Ridwan トレスナ ヌグラ ハ Tresna Nugraha 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	教授 教授 教授 准教授 准教授 准教授 助教 助教 助教 助教 助教 助教 助教 助教	15
	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	ゲ リット バウアー Gerrit Bauer 教授 * のむら けんたろう 野村 健太郎 准教授 * きとう こうじ 佐藤 浩司 助教 こばやし こうじ 小林 浩二 助教 なかい りょうた 仲井 良太 助教 メフルダード エリヤシ Mehrdad Elyasi 助教 ウェイ チャオ ユ Weichao Yu 助教	教授 * 准教授 * 助教 助教 助教 助教 助教	17

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	素粒子実験 (加速器) Experimental Particle Physics Group (Accelerators)	やまもと ひとし 山本 均 さぬき ともゆき 佐貫 智行 ながみね ただし 長嶺 忠 よなみね りょう 與那嶺 亮	教授* 准教授 助教 助教	18
		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 すえかね ふみひこ 末包 文彦 こ が まさゆき 古賀 真之 しみず いたる 清水 格 みつい ただお 三井 唯夫 なかむら けんご 中村 健悟 いけだ はるお 池田 晴雄 いしどしろ こうじ 石徹白 晃治 うえしま こうた 上島 孝太 がんだう よしひと 丸藤 祐仁 たまえ きょうこ 玉江 京子 わたなべ ひろこ 渡辺 寛子	教授 教授 教授 准教授 准教授 准教授 講師 助教 助教 助教 助教 助教 助教 助教 助教 助教 助教 助教 助教	20
	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	原子核物理 Experimental Nuclear Physics Group	たむら ひろかず 田村 裕和 なかむら さとし 中村 哲 いわさ なおひと 岩佐 直仁 こいけ たけし 小池 武志 せきぐち きみこ 関口 仁子 み わ こうじ 三輪 浩司 かねた まさし 金田 雅司 ながお しょう 永尾 翔 ほんだ りょうたろう 本多 良太郎 み き けんじろう 三木 謙二郎	教授 教授 准教授 准教授 ¹ 准教授 准教授 助教 助教 助教 助教 助教 助教 助教 助教 助教	22

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	24
			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	
			みうら きだお 三浦 禎雄	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	
			つかだ きょう 塚田 暁	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	核放射線物理 Nuclear Radiation Physics Group	いとう まさとし 伊藤 正俊	教授	26	
		てらかわ あつき 寺川 貴樹	教授		
		たなか かづお 田中 香津生	助教		
		まつだ ようへい 松田 洋平	助教		
加速器科学講座 Accelerator Science	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)	27	
		たなか かずひろ 田中 万博	教授 ² (委嘱)		
		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 – 関連物理学講座 Strongly Interacting Many Particle Quantum System ¹ 材料科学高等研究所 Advanced Institute for Materials Research	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 ¹	28
			たかはし たかし 高橋 隆	教授 ¹	
	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	ナノ固体物理 Nano Solid-State Physics Group	そうま せいご 相馬 清吾	准教授 ²	29
			すがわら かつあき 菅原 克明	准教授	
		極低温量子物理 Low Temperature Quantum Physics Group	なかやま こうすけ 中山 耕輔	助教	30
			たにがき かつみ 谷垣 勝己	教授 ^{1*}	
			しもたに ひでかず 下谷 秀和	准教授	31
			まつした 松下	助教	
			ステファン 悠	助教	32
			おちあい あきら 落合 明	教授 [*]	
			きむら のりあき 木村 憲彰	准教授	33
			かべや のりゆき 壁谷 典幸	助教	
		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	講師	
		微視的構造物性 Microscopic Structural Condensed Matter Physics Group	あおやま たくや 青山 拓也	助教	32
			わかばやし ゆうすけ 若林 裕助	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

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	教授 准教授 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 ひらた みちひろ 平田 倫啓 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	教授 准教授	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 はらだ たかゆき 原田 尚之	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: 日本原子力研究開発機構 Japan Atomic Energy Agency 2連携大学院:分子科学研究所 Institute for Molecular Science 3連携大学院 高輝度光科学研究センター Japan Synchrotron Radiation Research Institute	強相関電子物理 Strongly Correlated Electron Physics Group	ふじもり しんいち 藤森 伸一 やまもと ひろし 山本 浩史 いけもと ゆ か 池本 夕佳	教授 ¹ (客員) 教授 ² (委嘱) 准教授 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	表面物理 * Surface Physics Group	すとう しょうぞう 須藤 彰 三 えぐち とよあき 江口 豊明	教授 * 准教授 *	40
		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 みやた ひでたけ 宮田 英威 おおば てつひこ 大場 哲彦 さくま ゆか 佐久間 由香	教授 准教授 * 助教 助教	41
		光物性物理 Solid State Photophysics Group	いしはら てるや 石原 照也 よしざわ まさゆき 吉澤 雅幸 まつばら まさかず 松原 正和 おおの せいご 大野 誠吾 とみた さとし 富田 知志	教授 教授 准教授 助教 助教 ¹	42
		量子伝導物性 Solid-State Quantum Transport Group	ひらやま よしろう 平山 祥郎 ゆきさ ごう 遊佐 剛 はしもと かつし 橋本 克之 モ ハ マッド Mohammad ハ ム ザ ファウジ Hamzah Fauzi とみまつ とおる 富松 透	教授 * 准教授 助教 助教 助教	43
	結晶物理学講座 Crystal Physics 協力講座:金属材料研究所 Institute for Materials Research	超高速分光 Ultrafast Spectroscopy Group	いわい しんいちろう 岩井 伸一郎 いとう ひろたけ 伊藤 弘毅 かわかみ ようへい 川上 洋平	教授 助教 助教	44
		スピン機能物質科学 Spin-Related Functional Materials Science Group	おの せ よしのり 小野瀬 佳文 おおの ゆたか 大野 裕 にい よういち 新居 陽一 ますだ ひでとし 増田 英俊	教授 准教授 助教 助教	45
		結晶成長物理 Crystal Growth Physics Group	ふじわら こうぞう 藤原 航三 もりと はるひこ 森戸 春彦 しが けいじ 志賀 敬次 まえだ けんさく 前田 健作	教授 准教授 助教 助教	46

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	47
		スピン量子物性 Quantum Spin Physics Group	きとう たく 佐藤 卓 おくやま だいすけ 奥山 大輔 なわ かずひろ 那波 和宏	教授 助教 助教	48
		電子線ナノ物理 Electron Crystallography and Spectroscopy Group	てらうち まさみ 寺内 正己 きとう ようへい 佐藤 庸平 もりかわ だいすけ 森川 大輔	教授 准教授 助教	49
		結晶構造物性 Structural Physics and Crystal Physics Group	きむら ひろゆき 木村 宏之 さかくら てるとし 坂倉 輝俊 やまもと はじめ 山本 孟	教授 助教 助教	50
	量子計測講座 Quantum Sensing and Measurement 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: NTT 物性科学基礎研究所 NTT Basic Research Laboratories	量子計測 Quantum Sensing and Measurement Group	あだち しんいち 足立 伸一 おおたに ちこう 大谷 知行 やまぐち ひろし 山口 浩司	教授 ¹ (客員) 教授 ² (客員) 教授 ³ (客員)	51

素粒子・宇宙理論グループ

Particle Theory and Cosmology Group

高橋 史宜 教授 日笠 健一 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 綿村 哲 准教授*

北嶋 直弥 助教 堀田 昌寛 助教 山田 洋一 助教 横崎 統三 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、物質のもっと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もっと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んである。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つはゲージ理論でよく記述できることが知られている。この理論は標準模型と呼ばれるが、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。

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。これを引き起こすのがヒッグス粒子であり、これまでその探索が続けられていた。そしてついに2012年にヒッグスと思われる新粒子がLHC実験において発見された。翌2013年には標準理論のヒッグス粒子が持つべき相互作用、崩壊過程、スピン、パリティと矛盾が無い事が明らかになった。今後この新粒子の性質について詳細に調べることで、標準模型の実験的検証および標準模型を超える新たな物理の探索が飛躍的に進むと期待されている。

標準模型に内在する理論的不満足さを解決するために、これまで種々の新たな物理が提唱されてきた。その中で、超対称理論と呼ばれる理論が注目を集めている。この理論は3つの相

互作用を1つに統合する試みである大統一理論とも関係が深い。しかしこれらの理論に含まれる超対称性粒子の存在を示すはっきりした証拠は見つかっていない。別の可能性として、3次元空間以外の「余剰次元」空間の存在が物理法則を規定する可能性や、第2の強い相互作用が対称性の破れを起こす可能性もある。いずれの場合にも、TeV エネルギー領域までに標準模型を超える物理が現われることが予想される。

これらの新しい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 of 両方向での実験が計画されている。特に、本格的に始動した LHC 実験においては、従来より一桁近い高エネルギーの反応が可能となるため、未知の粒子の発見など新たな知見が得られるものと期待されている。一方、陽子崩壊やレプトンフレーバー非保存の探索やニュートリノの質量・混合も大統一理論と関連する重要なテーマであり、日本はこの分野の世界の研究をリードしている。

一方、素粒子はもっと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。実際、重力の量子論的效果が重要になるのは宇宙のごく初期やブラックホールのような極めて特殊な場面に限られることも量子重力へのアプローチを難しいものにしていく。量子重力理論の有力な候補として超弦理論がある。超弦理論については最近興味ある発展がなされており、ブレーン時空、ゲージ理論と重力理論の双対性、非可換幾何などさまざまな方面の追求がされているが、いまだに多くの未解決の問題も含んでいる。

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) 素粒子モデルの研究

標準模型に内包する問題であるエネルギースケールの階層性の問題を説明する超対称理論や余剰次元理論等の素粒子模型の研究、また、力の統一理論の研究を行っている。

(2) 高エネルギー現象の理論的研究

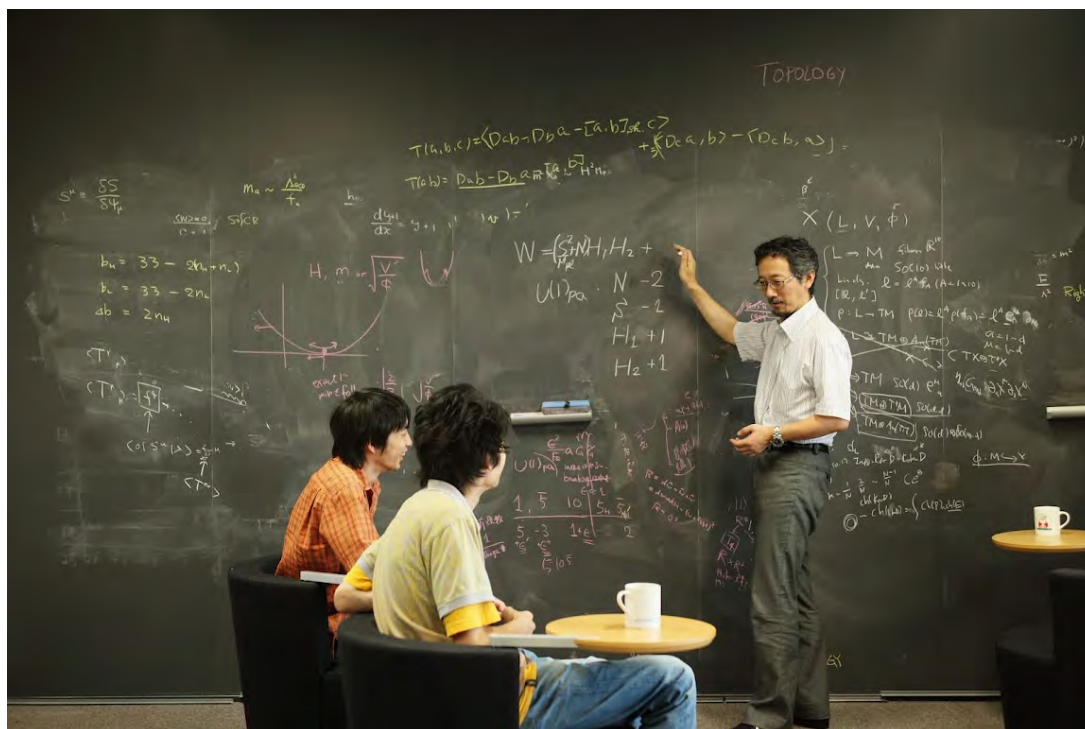
稼働中および計画中の高エネルギー最前線のコライダー実験における素粒子現象の理論的研究や、様々な精密測定における新現象の出現についての理論的研究を行っている。

(3) 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。

(4) 超弦理論、量子重力理論、非可換幾何学などの研究

短距離での時空概念の拡張を目指し、超弦理論や非可換幾何学などの研究を進めている。また、超弦理論に基づく統一理論の構築を目指している。



原子核理論グループ

Nuclear Theory Group

佐々木 勝一 准教授 萩野 浩一 准教授

遠藤 晋平 助教 小野 章 助教 谷村 雄介 助教 丸山 政弘 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る。その活動は主に二つに分類できる。一つは多数の核子（陽子や中性子）から成る量子多体系としての原子核の構造とそれを支配する動力学についての研究である。もう一つは、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（核子や π 中間子およびその励起状態）の構造や高温高密度核物質についての研究である。

前者は主に萩野が主宰する核子多体サブグループにより研究が行なわれており、強い相互作用をする核子が多粒子系としての集団をつくることにより初めて現れる、複雑な状態やその動的な時間変化に関する研究を進めている。一方、後者は主に佐々木が主宰するハドロン・サブグループにより行なわれており、クォークとグルーオンを自由度として強い相互作用を記述する量子色力学（QCD）に基づいて、核子を含むハドロン粒子の研究を行っている。

図は、2つの原子核を衝突させたときに起こる典型的な現象を3つの特徴的なエネルギー領域と本グループの研究内容に関連付けてイメージ化したものである。まず図の左側は、衝突のエネルギーが低いときに対応する。本グループは、このエネルギー領域で起こる核融合反応や弾性散乱、非弾性散乱などの低エネルギー重イオン反応の研究において、多くの

研究実績を持つ。この関連で、ニホニウムなどの超重元素の生成反応の研究にも取り組んでいる。その他、近年発展がめざましい中性子過剰核の構造と反応についても研究を進めている。ここでの興味は、核子間にはたらく相関が存在限界近傍の原子核の基底状態や励起状態の構造、及び崩壊や反応のダイナミクスにどのような影響を及ぼすのか、ということである。この他にも、ハイパー核の構造と励起状態についても理論研究を行っている。

中間エネルギーにおける原子核衝突では比較的高温高密度状態が実現し、そのような状況化での原子核の特性（状態方程式）を探ることは、中性子星や超新星爆発などの研究とも密接に関連して原子核物理の重要課題である。これに関連し、冷却原子からなる少数多体系の物理に関する研究が遠藤によって行われている。

さらに高いエネルギーで2つの原子核が衝突すると、図の右側に示すように、真空の構造が変化しクォークとグルーオンのプラズマ状態（QGP）が生成されると予想されている。本グループではこのQGPの問題に関する研究についても、超高温超高密度におけるQCDの真空構造の相転移として、QCDの量子多体問題という観点から理論的に研究を行っている。その手法は、場の量子論による解析的なアプローチや時空を格子状に正則化して定義されたQCDの数値シミュレーション（格子QCD）による第一原理計算のアプローチなど多彩である。

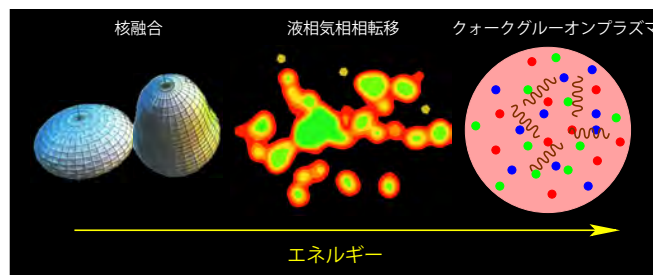


図. 衝突エネルギーによる原子核反応の変化

物性理論（理学部）グループ

Theoretical Condensed Matter and Statistical Physics Group

石原 純夫 教授 川勝 年洋 教授 齋藤 理一郎 教授

内田 就也 准教授 是常 隆 准教授 柴田 尚和 准教授

泉田 渉 助教 小野 淳 助教 中島 龍也 助教

Ahmad Ridwan Tresna Nugraha 助教 村島 隆浩 助教 横山 寿敏 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テリアルまで多岐にわたる。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、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] 相互作用の強い電子系の量子物性（石原、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。

[2] 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。

[3] 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、Nugraha）

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・ヌグラハは、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。

[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。

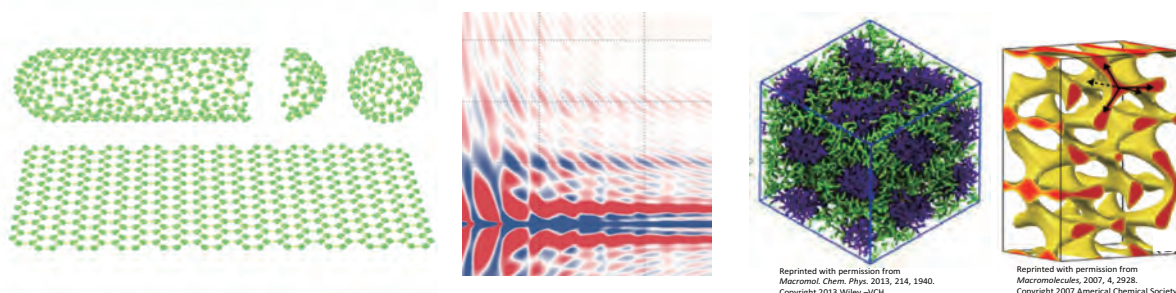
[5] 第一原理計算を用いた物性解明（是常）

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なくてはならない手法となつつある。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] 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。



（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

Gerrit E. W. Bauer 教授*

野村 健太郎 准教授*

佐藤浩司 助教 小林浩二 助教 仲井良太 助教 Mehrdad Elyasi 助教 Weichao Yu 助教

<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、スピンの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

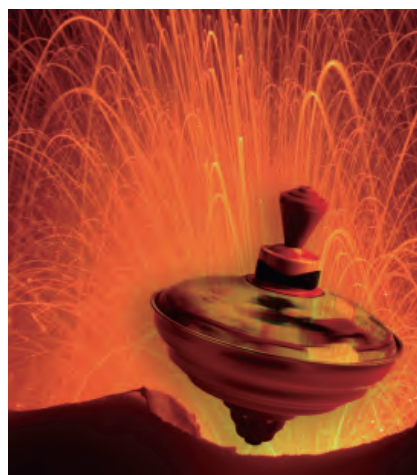


図1. スピン・カロリトロニクスのイメージ。熱がスピン角運動量と相互作用する。

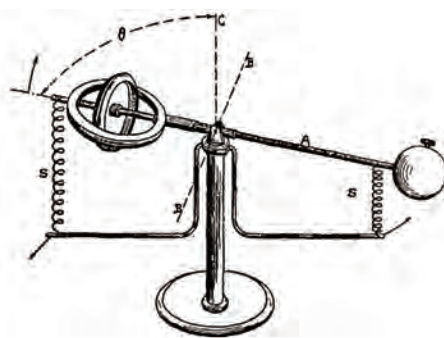


図2. バーネット効果の古典的アナロジー。ジャイロスコープが回転（スピン）するとA軸の傾き θ が変化する。

素粒子実験（加速器）グループ

Elementary Particle Physics (Accelerators) Group

山本 均 教授* 佐貫 智行 准教授

長嶺 忠 助教 與那嶺 亮 助教

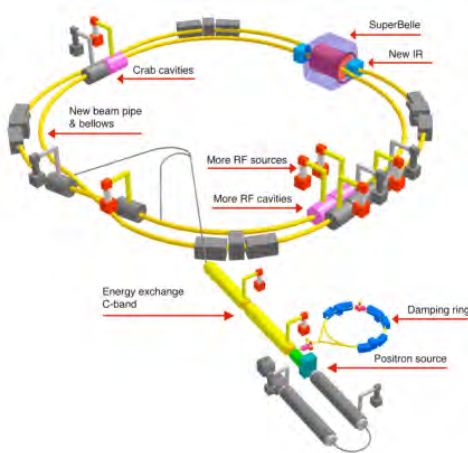
<http://epx.phys.tohoku.ac.jp/>

E-mail: yhitoshi@epx.phys.tohoku.ac.jp Tel: 022-795-6730

BELLE 実験

我々の宇宙は約 138 億年前にビッグバンと呼ばれる「大爆発」によって無から生まれたと考えられています。すると現在粒子と反粒子が同じ数だけ存在するのが自然ですが、実際には我々の宇宙には、陽子、中性子、電子などの粒子（もしくは「物質」）がそれらの反粒子（もしくは「反物質」）よりはるかに多く存在します。この粒子と反粒子の非対称性が起こるためには、ビッグバンのあと、どこかで粒子と反粒子も対称性を破る反応があったはずで

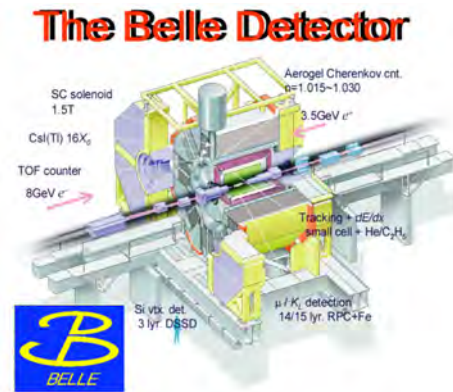
す。電磁気学も古典力学も粒子と反粒子の対称性を持っていますが、約 50 年前に素粒子の世界では粒子と反粒子の対称性が破れていることが実験的に見つかりました。この現象を理論的に説明したのが小林・益川両先生です。そして理論の提唱から約 35 年後、B ファクトリーによる実験的検証のあと 2008 年に両先生はノーベル賞を受賞しました。



SuperKEKB の概念図

茨城県つくば市にある高エネルギー研究所の B ファクトリー（KEKB）では、電子と陽電子を加速し正面衝突させて陽子の約 5 倍の重さを持つ B 中間子という粒子を生成します。

小林・益川理論によると、B 中間子の崩壊において数十%という粒子と反粒子の大きな非対称性が予想されていましたが、KEKB において予想通りの非対称性が観測されたのです。ただし、我々の宇宙の現在の粒子反粒子の対称性の破れは小林・益川理論だけでは説明が出来ないこともわかっています。すなわち、小林・益川理論以外の粒子反粒子対称性の破れがあるはずであり、それは B 中間子をさらに精密に測定すれば観測にかかる可能性があります。また、新しい物理現象は B 中間子の希少崩壊において現れるかもしれません。そのために KEKB のビーム強度を約 40 倍に増強する計画、SuperKEKB 計画、が遂に実現したところ

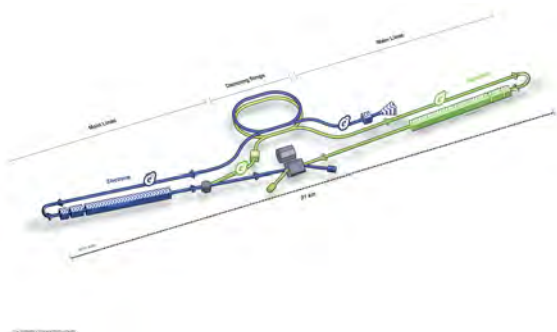


私たちのグループは KEKB の発足当初から BELLE 実験において主導的役割を果たしてきました。現在物理解析では、BELLE 実験のデータを使い、2つの研究をしています。ひとつは粒子反粒子対称性に関するパラメータのなかでもとくに重要でありかつ難しいといわれる位相角 ϕ_3 の測定です。もうひとつは超対称性粒子などの新物理に敏感な電弱ペンギン崩壊 $b \rightarrow s\gamma$, $b \rightarrow sll$ の精密測定です。一方、SuperKEKB ではビーム強度が格段に増えるため、現在のままの衝突点付近の設計では背

景事象が多すぎて目的の事象をはっきりと測定することができません。それどころか測定器が壊れてしまう可能性もあります。そのために背景事象を詳しく研究し、それに対応した新しい衝突点近傍の設計を行っています。また、SuperKEKBの測定器 BELLE-II のシリコン飛跡検出器の設計製作や、最先端の半導体技術を用いた SOI ピクセル反応点検出器の開発を行っています。

国際リニアコライダー (ILC)

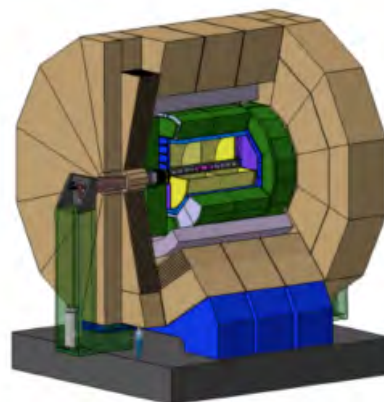
国際リニアコライダー (ILC) は次世代の大型加速器として世界的に推進されている計画で、電子と陽電子を全長約 20km の線形加速器でそれぞれ陽子の重さの 125 倍のエネルギーになるまで加速し正面衝突させ、ビッグバン直後の状態を再現しようとしています。研究者たちは、岩手県と宮城県に広がる北上山地をこの ILC の建設候補地として決定しました。円形の加速器の場合は電子を高エネルギーに加速するとシンクロトロン放射によりエネルギーの 4 乗に比例してビームエネルギーを失いますが、ILC のように線形の場合にはシンクロトロン放射によるエネルギー損失は小さく、それゆえに将来のエネルギー高度化の可能性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

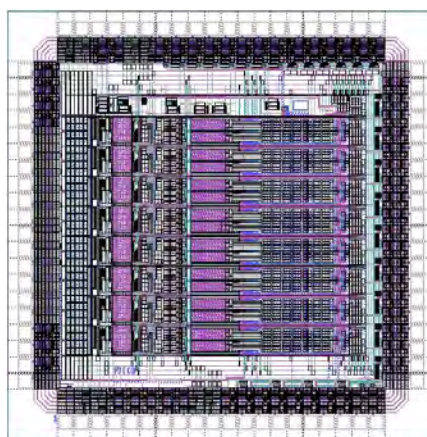
衝突によって生成される粒子にヒッグス粒子があります。ヒッグス粒子は現在の素粒子の「標準理論」において全ての素粒子の質量の起源となっている粒子です。2012 年 7 月、スイスとフランスの国境にある CERN 研究所の大ハドロン衝突器 (LHC) でヒッグスらしき粒子が発見されました。この粒子を発見するのに LHC は約 2 年かかりましたが、ILC では 1 日で見えてしまいます。もちろんヒッグス粒子はすでに発見されていますが、これは ILC の新粒子発見能力が高いことを物語っています。

LHC は今後もビーム強度を高度化していきます。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。物理と測定器の研究において国際的にリーダーシップをとり、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そ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、ILC の測定器には未曾有の分解能が要求されるため、とくに反応点検出器とその高速読み出し回路に重点をおいて研究開発を進めています。さらに、ナノメートルサイズのビームの大きさや方向を測定するための装置を開発しています。



反応点測定器の読み出しチップ

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 中村 健悟 講師

池田 晴雄 助教 石徹白 晃治 助教 上島 孝太 助教

丸藤 祐仁 助教 玉江 京子 助教 渡辺 寛子 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

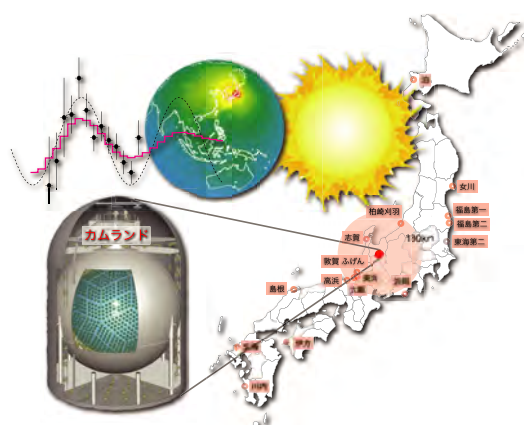
自然や宇宙は巨大な素粒子実験室である。身の回りには宇宙創成期、進化期の情報を持った素粒子がさまよい、地球や太陽、銀河からは絶えず素粒子が放出され、地上に降り注いでくる。これらの粒子を検出して素粒子や宇宙を研究することが、非加速器素粒子実験の目的である。中でもニュートリノは弱い相互作用しかしないため、宇宙初期から太陽内部、星の終焉、地球内部の情報までも直接現在の我々人類に伝えてくれる。さらに、ニュートリノの極端に軽い質量構造や、ニュートリノ間の結びつきは、素粒子大統一理論を反映しており、宇宙が物質のみから構成されている事の原因とも考えられる。このようなニュートリノの研究は、素粒子物理学はもちろん宇宙物理・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。

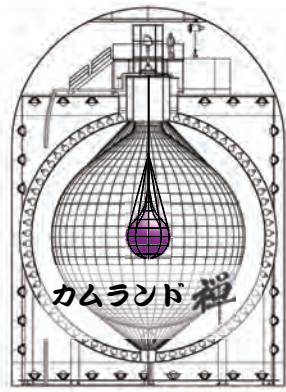
この検出器によって原子炉からの反電子ニュートリノ観測を行い、ニュートリノの見かけの数が距離とともに減少・復元を繰り返すニュートリノ振動を2サイクル以上にわたって捉え、30年以上未解決であった太陽ニュートリノの謎を解決するとともに、ニュートリノ振動パラメータの精密測定を達成した。

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。

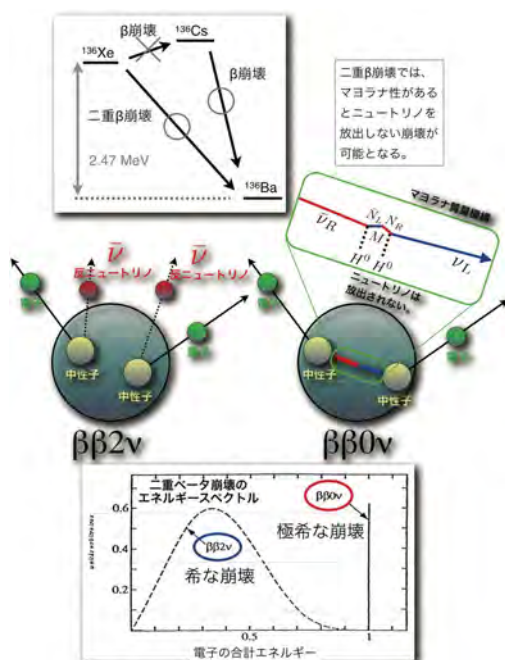


今では、カムランドの観測精度向上により地熱に占める放射性物質の寄与の割合を検証できるようになってきているが、特に停止している原子炉が多い現状は地球ニュートリノ観測の精度向上に適しており、急速な発展が見込まれる。さらなるニュートリノ利用の実践として、太陽ニュートリノ観測による太陽内部の直接観測とそれによる恒星進化の究明、超新星爆発ニュートリノの観測による宇宙の進化の研究も推進する。

また新たに、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」が始まった。



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。ニュートリノ科学研究センターが推進する本プロジェクトでは、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が進行中である。国際的な共同研究のもとで、将来の他核種での二重 β 崩壊研究、暗黒物質の探索、第4世代ニュートリノの探索のための研究開発が進行中であり、アイデア次第で多様な発展が期待できる状況にある。



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。

Double Chooz 及び JSNS² ニュートリノ実験

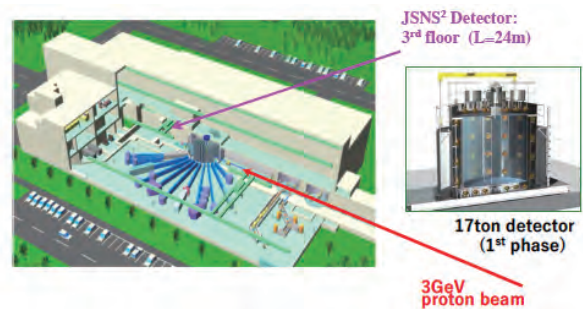
本研究グループは、フランスの Chooz 原子力発電所で Double Chooz 実験を行い、スーパーカミオカンデ、カムランドに続く、第3のニュートリノ振動を検出することに成功し、 θ_{13} と呼ばれるニュートリノ混合角を次のように測定した。

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

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。

さらに原子炉ニュートリノ検出技術を用いて、原子炉によるプルトニウム生成の監視システムの開発を行い、ニュートリノの実社会への応用の可能性を追求している。

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 実験を準備中である（下図）。JSNS² 実験は、2019年からデータ収集開始を予定している。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。



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 本多 良太郎 助教 三木 謙二郎 助教 永尾 翔 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。

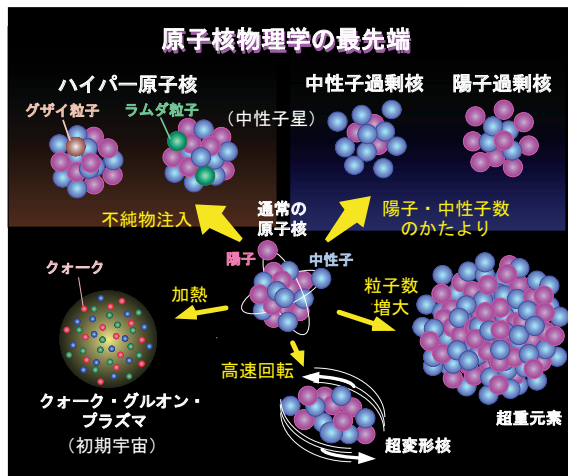


図 1. 原子核物理学の最先端

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）の実験的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) 我々はラムダハイパー核から放出される γ 線の精密測定に世界で初めて成功した。J-PARC の大強度ビームを使ってこのハイパー核精密 γ 分光研究を格段に発展させるため、新たに開発した大型半導体検出器群 (Hyperball-J)（図 3）を用いて実験を進めている。さらに、J-PARC で

¹ 高教機構

シグマ粒子やグザイ粒子と核子との相互作用を初めて調べる実験も進めており、新方式によるシグマ・陽子散乱実験を実施中である。(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た中性 K 中間子光生成反応研究を推進、さらに Λn 終状態相互作用、 $^3_\Lambda\text{H}$ ハイパー核寿命測定実験といった新実験計画を準備し電磁プローブによるストレンジネス核物理の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。

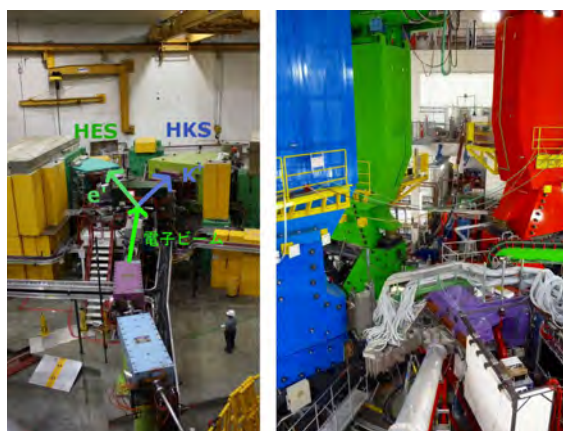


図 2. (左) 米国 JLab に設置した HKS および HES. (右) ドイツ MAMI-C の Spek-A, B, C スペクトロメータ (赤, 青, 緑) と KAOS (紫)。

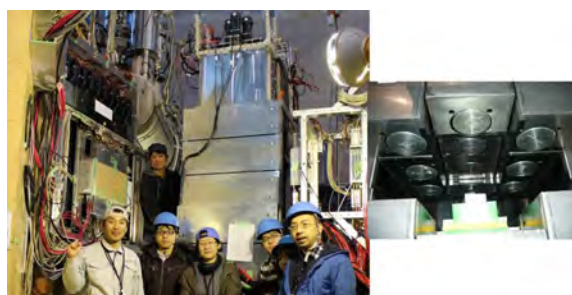


図 3. (左) ハイパー核 γ 線が精密に測れる世界唯一の装置 Hyperball-J と、(右) その心臓部。

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 ^3He 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。

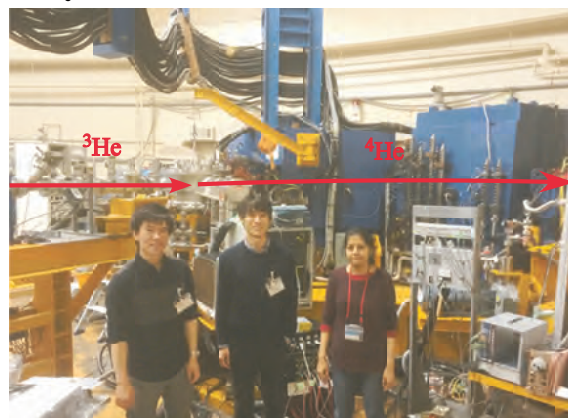


図 5. 原研タンデムで行った実験で使った磁気分析装置 ENMA

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

三浦 禎雄 准教授 村松 憲仁 准教授

石川 貴嗣 助教 佐田 優太 助教 塚田 暁 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

<http://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

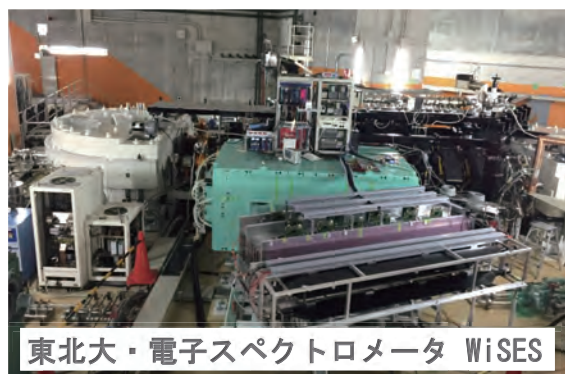
陽子は、中性子とともに原子核を構成する基本粒子である。長年、大きさや形、内部構造が詳細に調べられてきたが、最近、電子とミュー粒子による陽子半径測定結果に深刻な不一致があることが明らかになり「陽子半径問題」と呼ばれる事態になっている。素粒子物理学の金

字塔である「標準理論」では電子とミュー粒子は同じ性質をもつ粒子と考えられているため、「陽子半径問題」は「標準理論」の「ほころび」を示唆しているとの指摘もある。この「陽子半径問題」の原因解明のため、最も信頼度の高い陽子半径決定が可能な極低運動量移行領域での電子散乱実験を電子光センターの電子加速器で行う。

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で崩壊してしまう不安定なエキゾチック原子核の研究により、安定な原子核では知られていなかった奇妙な形状や内部構造が次々と明らかになっている。これら奇妙な形状や内部構造の詳細な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が分かっており、エキゾチック原子核研究は現代の原子核物理学の最重要課題と認識され世界各地で鎬を削る研究が進んでいる。

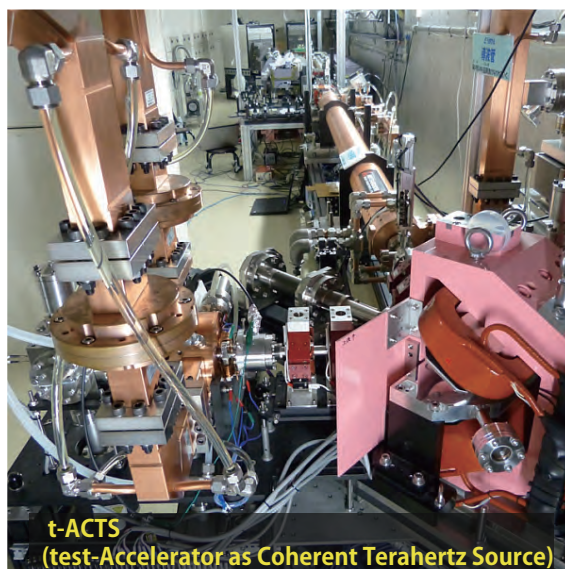
電子散乱は原子核の内部構造を解き明かす最も優れた方法であるが、短寿命で崩壊する不安定核はその生成が大変難しいため電子散乱実験は不可能と考えられていた。我々は、この壁を打ち破る革新的実験技術（SCRIT: Self-Confining RI Ion Target）を発明し、世界初のエキゾチック核専用の電子散乱施設を理化学研究所に建設した。電子光物理学研究センターが建設した大型電子スペクトロメータ（WiSES: Window-frame Spectrometer for Electron Scattering、下記写真）による測定が行われている。



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

田中 香津生 助教 松田 洋平 助教

<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)

田中 万博 教授 (委嘱)

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原子核・素粒子物理の研究を行う。

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) に最近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。

現在は、加速器のビーム出力最終目標 (RCS: 1 MW, MR: 0.75 MW 以上) の早期達成にむけて、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、ビーム損失の低減など、ハード・ソフト両面の研究を進めている。特に、2014 年 1 月からリニアックのエネルギーが設計値である 400 MeV に増強され、さらに、イオン源、及びリニアック上流部の加速空洞が大強度仕様に変更され、RCS と MR のビーム強度の圧倒的な向上が期待されている。

大強度陽子加速器を用いたハドロン科学の研究 (田中万博)

J-PARC ハドロン実験施設では、50 GeV 陽子加速器から得られる大強度陽子ビームを用いて世界最高強度の K 中間子ビームを発生させ、これを用いてハイパー原子核の研究や K 中間子の稀崩壊の研究などを展開している。当ハドロン科学グループはビーム輸送系やスペクトロメータといった、実験のために必要な大型ハードウェアの設計、建設、運用を通じて、ハドロン実験施設での素粒子・原子核物理学の実験・研究に寄与している。2018 年 1 月には陽子ビーム強度は 50 kW を超え、ハイパー原子核の研究はこれまでのストレンジネス 1 個を含む状態の研究から、2 個以上のストレンジネスを含む状態の研究に移行しつつある。このような多重ストレンジネス状態は、中性子星

などの高密度環境にのみ存在していると考えられており、その意味で我々は、宇宙深奥の極限状態を実験室内に再現しつつあると言える。



図 1. ハドロン実験施設に設置した二次ビーム分析器 (緑色) と超伝導 K 中間子スペクトロメータ “SKS” (黄色)。

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。

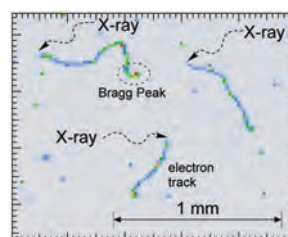


図 2. シリコン結晶中でのコンプトン散乱電子を、先進 LSI 技術による微細ピクセル型粒子検出器 (SOI Pixel Sensor) により観測 (視覚化) した画像。

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

高橋 隆 教授 (AIMR) 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。

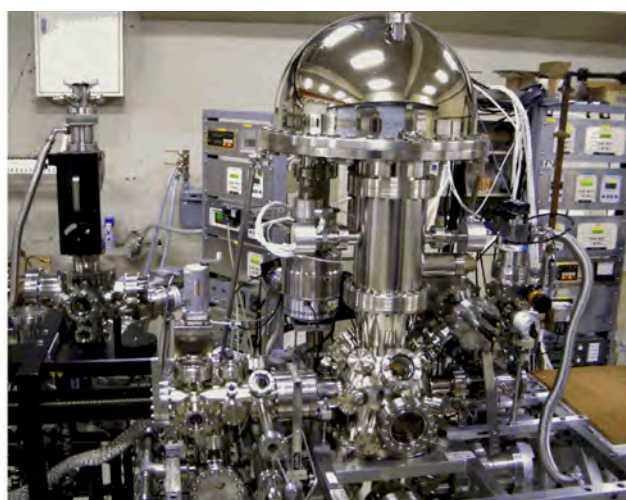


図1 東北大学に建設した世界最高水準のエネルギー分解能を有する ARPES 装置

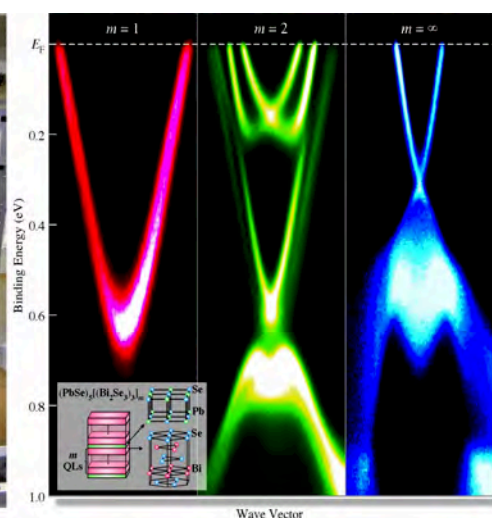


図2 角度分解光電子分光で決定したトポロジカル絶縁体超構造のバンド分散

ナノ固体物理グループ

Nano Solid-State Physics Group

谷垣 勝己 教授 (AIMR)* 下谷 秀和 准教授 松下 ステファン 悠 助教

<http://sspns.phys.tohoku.ac.jp/> e-mail: tanigaki@tohoku.ac.jp

近年の物性物理学の進展は、物質の極微細構造に踏み込んで物性と構造との関係を理解し、それを基礎として新しい素材を開拓する時代に突入している。現在では、電子線加工技術などにより 10 nm 程度のサイズの加工が可能である。トンネルスペクトロスコピーを利用すれば原子を 1 個ずつ制御する事が可能な時代でもある。しかし、原子を 1 個ずつ並べていたのでは、重要な物性が発現するような構造体を構築するためには、半永久的な時間が必要となる。このような状況において、図 1 に示すナノ領域の構造の幾何対称性は、物質の基本的物性と密接に関係している。ナノ構造物質は、幾何対称性を考慮して新物質を創製することができ、発現する物性を微小領域の構造に基づいて精密に制御する事のできる新しい物質系といえる。

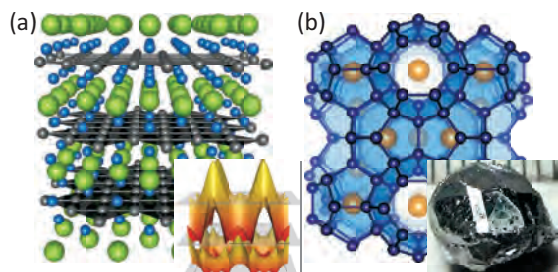


図 1. (a)鉄系超伝導体の幾何対称性から生まれる特異な電子状態（ディラック・コーン）。(b)クラスレート化合物の結晶構造と結晶の写真。シリコンやゲルマニウム（青色の球）でできたナノ空間中に閉じ込められたバリウム、ストロンチウム、ユーロピウム等の金属原子（橙色の球）が非調和フォノン物性を発現させる。

電気伝導はスピンと電荷の属性を有するフェルミ粒子が運ぶ電荷の流れであり、磁性はスピンの磁気モーメントが配列する事により物性として顕在化したものである。電子スピンの他媒体を介して種々の形で相互作用する場合には、さらに興味深い物性が発現する。例えば、電子スピン間の距離が離れている場合で

も、電子スピンは他の媒体の介在により配列し磁性が発現する。また、クーロン反発力ではなく引力が電子間に働き、超伝導が発現する。このような相互作用は一般に間接的相互作用として知られ、磁性ならびに超伝導発現のための重要な機構の一つである。

当研究室では、軽元素ならびに d 電子元素を中心とするナノ物質を基本構成要素として新しいナノ構造固体を創製して、それらの微細構造に基づいて発現する伝導・超伝導および磁性を物性物理の観点から研究している。地球上に普遍に存在する元素である炭素により構成される C_{60} やグラフェンおよび有機分子、Si/Ge から構成される $(Si/Ge)_{20}$ および 3d-二次元物質は、幾何対称性の観点から新しい量子状態を発現する可能性を秘めている。

また、デバイス構造を利用して、これらの物質と異種物質との界面における新しい物性や機能の創出をおこなっている。図 2 は電界効果トランジスタ構造を利用した有機発光素子で、これを用いた有機半導体レーザーの開発を行っている。同時に、得られる基礎的な理解に基づき、次世代の新素材につながる物性研究のニューパラダイムを創出するデバイス基礎理学を目指している。

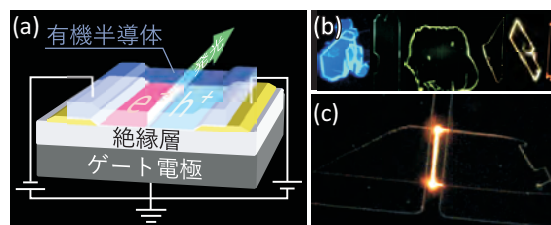


図 2. (a)ゲート電極を用いた電界効果を利用して有機半導体中で電子・正孔の再結合を生じさせる素子構造（有機発光電界効果トランジスタ）の模式図。(b)有機半導体結晶からの発光。分子の種類によりさまざまな波長の発光を実現できる。(c)有機半導体単結晶を用いた発光電界効果トランジスタ（上面図）。

極低温量子物理グループ

Low Temperature Quantum Physics Group

落合 明 教授* 木村 憲彰 准教授 壁谷典幸 助教

<http://www.vlt.phys.tohoku.ac.jp/> E-mail: aochiai@mail.clts.tohoku.ac.jp

物質は一辺が 1 cm の箱当たりにして 10^{23} 個の電子を入れた超巨大多体系です。適当な箱を選ぶこと — つまり、物質を選択すること — によって、この超巨大多体系を構成する電子間に強い相関を持たせる事（強相関電子系）ができます。強相関電子系の研究ではこれまでにない様々な量子現象が見出されており、そこはまさに物理学のフロンティアです。

本研究グループでは以下のような方法で強相関電子系の研究を進めています。

- (1) 物理学のフロンティア開拓につながる可能性を秘めた新物質の探索とその純良化。
- (2) 極低温、強磁場、高圧などの極限環境を用いた新しい量子現象の探索及びその起源となる電子状態の解明。

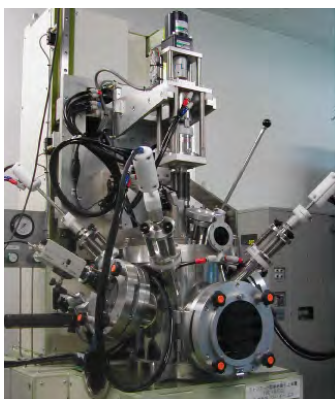


図1. 新物質開発用テトラアーク炉。純良結晶の育成に用いられます。

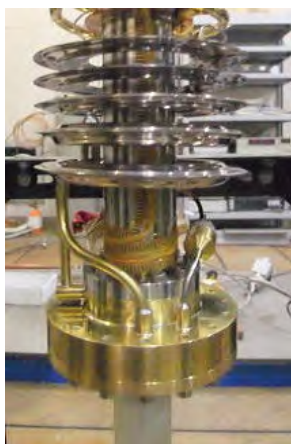


図2. トップローディング式希釈冷凍機。極低温領域での実験に用いられます。

現在は、以下のようなテーマに取り組んでいます。

- a) 希土類化合物における量子スピン系: 希土類化合物の中には稀に量子効果が顕著なスピン系として振舞うものがあります。このような量子スピン系の探索と、その異常な磁性状態について研究しています。
- b) 磁気量子臨界点の新奇物性: 磁気秩序温度が絶対零度まで落ち込む量子臨界点近傍（図3参照）では、従来のBCS型と異なる超伝導や特異な物性が発現します。これら起源を明らかにするとともに、量子臨界点における新しい物理概念の構築を目指しています。
- c) 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物質では、これまでにない新しい超伝導状態が出現することが予想されています。この新奇な超伝導状態の観測を目指して研究しています。

本研究グループにはこれらの研究目的を実施するために各種の試料作製装置から、極低温、強磁場、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ます。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ます。

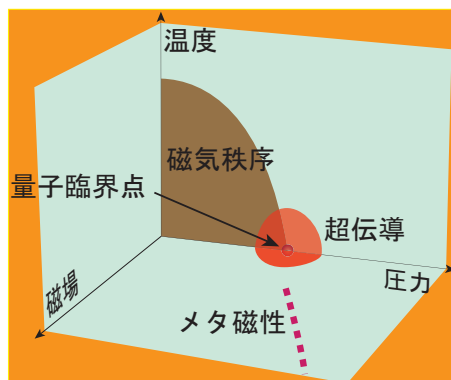


図3. 強相関電子系磁性体の温度-圧力-磁場相図。圧力により磁気秩序が抑制されると、秩序温度が絶対零度になる量子臨界点が現れます。

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 講師 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、エネルギースケールが大きいこと、電荷・スピン・軌道・副格子の内部自由度があること、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・鉄ニクタイド)、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。

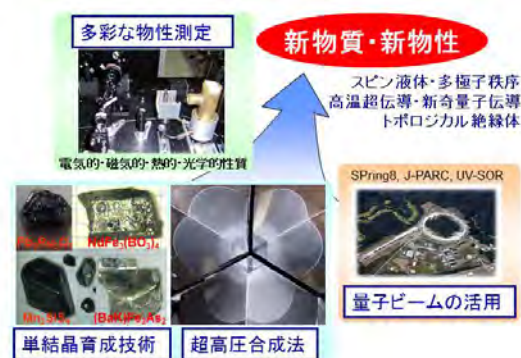


図 1 : 研究の概念図.

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・ニクタイド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。

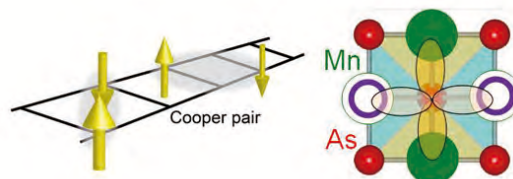


図 2 : 梯子格子における超伝導 (左) と磁気四極子秩序 (右) .

微視的構造物性グループ

Microscopic Structural Condensed Matter Physics Group

若林 裕助 教授

E-mail: yusuke.wakabayashi@gmail.com

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、フラストレート磁性体や軌道液体のような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 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。

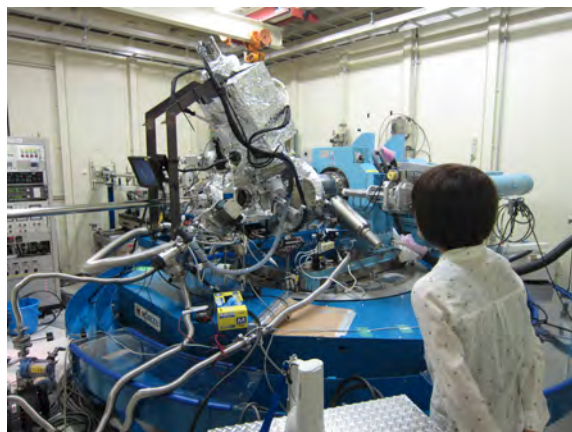


図1. SPring-8 BL13XU の表面回折計

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。

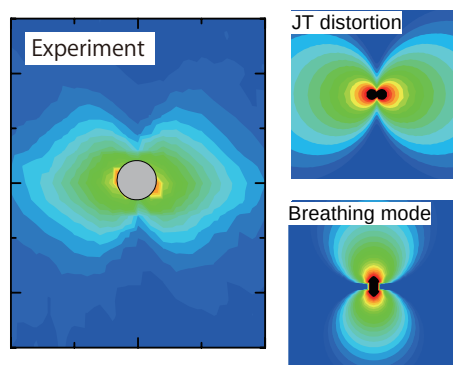


図2. $\text{Ba}_3\text{CuSb}_2\text{O}_9$ の軌道液体に対応するX線散漫散乱強度分布。左: 実験, 右: 異なるモードの歪みによるモデル計算強度。

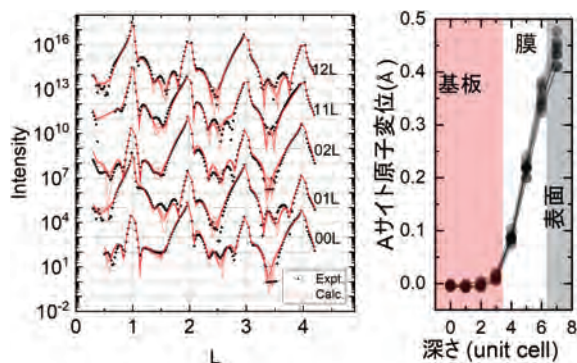


図3. モンテカルロ法による金属酸化物界面構造のベイズ推定の途中経過。(左) 散乱強度, (右) 金属サイトの変位量の深さ依存性。

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/> E-mail: hiroshi.matsui.b2@tohoku.ac.jp

1次元ナノチャンネル、2次元平面に挟まれたナノ空間、そして、かご（ケージ）状のナノ空間内におかれた水分子、プロトン、或いは生体高分子の動的な伝導・誘電特性（ダイナミックス）を研究しています。ナノ空間の形状、大きさ、種類に応じて、水素結合を介した水分子のつながり方は大きく異なり、特異な物性が現れます。ナノ空間に閉ざされた水分子は、生化学、医療、鉱物・地質学、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。現在力を注いでいる課題として、以下の項目があります。

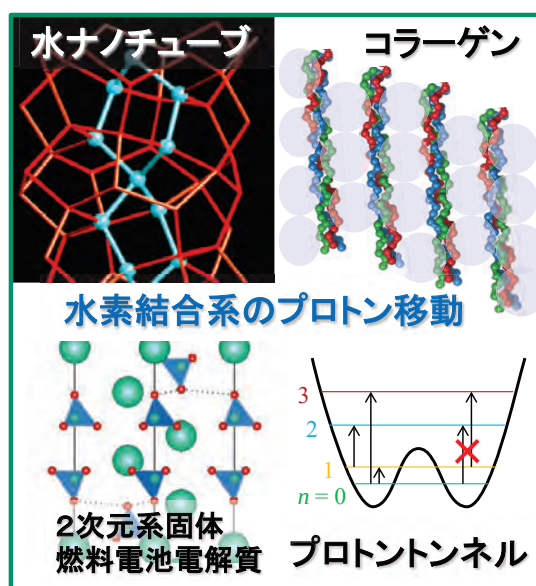
- (1) ナノ空間中に内包された水分子ネットワークの水和状態、及びプロトンの超広帯域伝導・誘電特性の研究。
- (2) コラーゲン（タンパク質）、キチン（多糖類）フィルムの水和状態とプロトン伝導性、および燃料電池電解質としての機能性の研究。
- (3) 超プロトン伝導体（ $\text{Cs}_3\text{H}(\text{SeO}_4)_2$ など）の超広帯域伝導特性とプロトン輸送機構の解明、及び新しい固体燃料電池電解質の開発。
- (4) ナノ空間に内包された水分子ケージの活用を目指し、Xe、メタンガス吸蔵の探索、及びプロトン伝導性の抑制効果の研究。

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、微小試料の顕微遠赤外分光測定は、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。

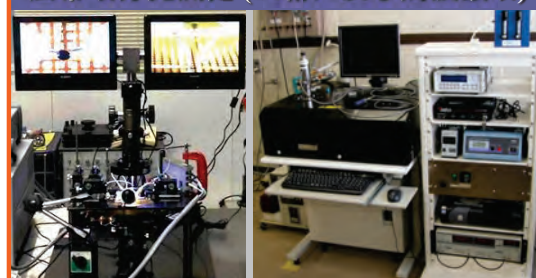
我々がもつ高周波技術を最大限に活用するため、他大学の多くの研究者と共同研究を推進し

ています。ナノ細孔中水分子をもつ分子性ナノ多孔質結晶試料は、少ないエネルギーで作れ、かつ、環境にも優しい物質です。こうした利点を活かし、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。また、通常廃棄される骨、皮、鱗、カニの甲羅などに含まれる糖、タンパク質を新たな電気材料としての利用を探っており、バイオプロトニクスデバイスの創生を目指します。

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。



広帯域分光測定 (14桁に及ぶ周波数域)



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

<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散乱とミュオンや放射光 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、鉄系超伝導を対象に、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] 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。

[3] 幾何学的フラストレーション系の磁性

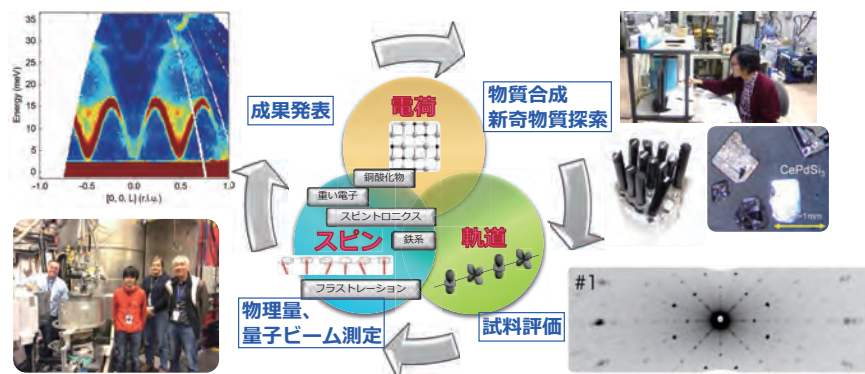
三角格子を含む系では最低エネルギーを持つスピンの向きが定まらず、スピンが揺らぎ秩序しない場合があります。スピンの時間・空間情報を中性子散乱によって明らかにしていきます。

[4] スピントロニクス基盤物資の磁気励起

現代のエレクトロニクスでは電荷からスピンに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、物理の解明と応用を目指しています。

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。新物質の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、中性子物性科学において国内最大級の専門研究室で、研究用原子炉に三台中性子装置を所有し、大強度陽子加速器施設 J-PARC に世界最先端のスピン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。宝探的な試料合成も行い、パワフルな量子ビーム実験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 平田 倫啓 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

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。世界最高磁場記録を有する先駆的研究で、SPring-8、J-PARC など国内3施設およびStanford 国立研究所、フランス、アメリカなど海外5施設での共同研究を展開しています。物質のバンド構造の変化に伴うごく僅かな結晶構造の歪みを超強磁場で検出し、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。

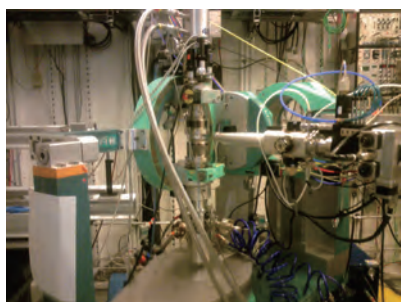
- 自分で世界1の装置を作ろう

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、どのよう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。

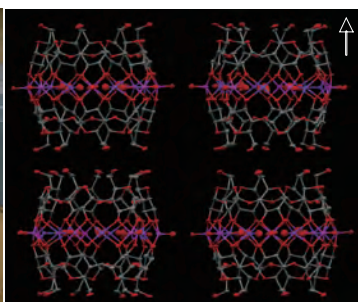
超強磁場 X 線装置 (APSシカゴ)



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

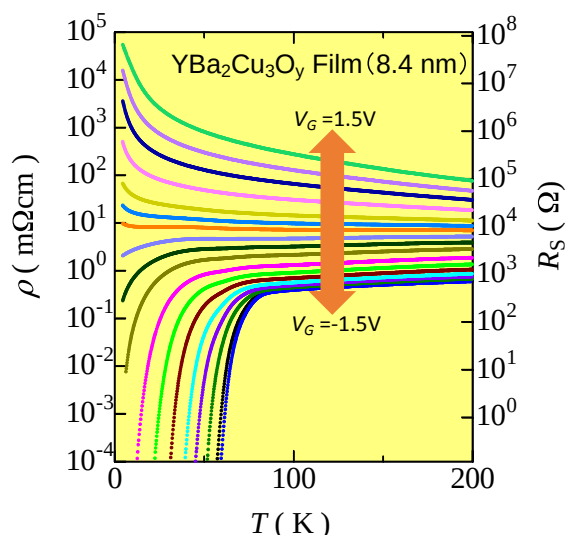
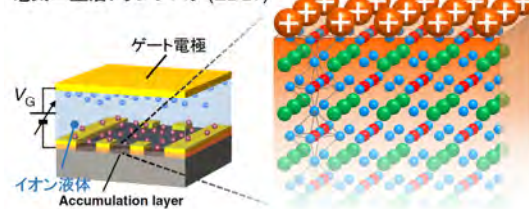
銅酸化物、鉄ニクタイト・鉄カルコゲナイドといった高温超伝導体では、大きな熱ゆらぎ

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。

電気二重層トランジスタ (EDLT)



（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 YBa₂Cu₃O_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

<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、冷却速度やエク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。

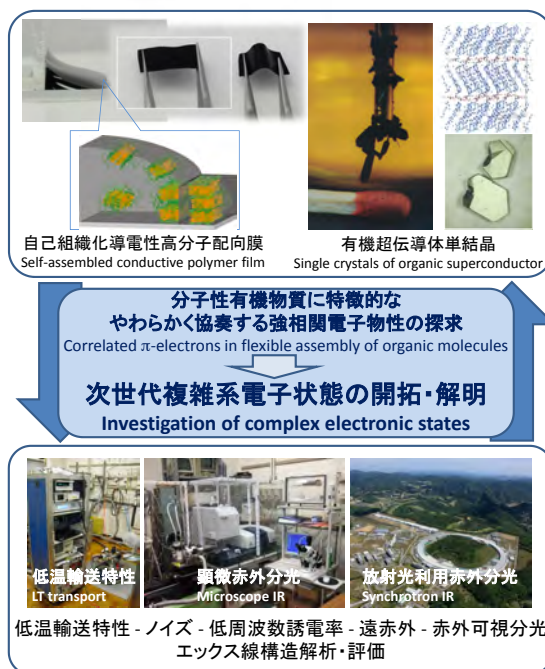
○ マルチスケールエネルギーランドスケープ描像が創出する新しいパイ電子物性

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 原田 尚之 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の単分子層や層状酸化物 PdCoO_2 の最表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。

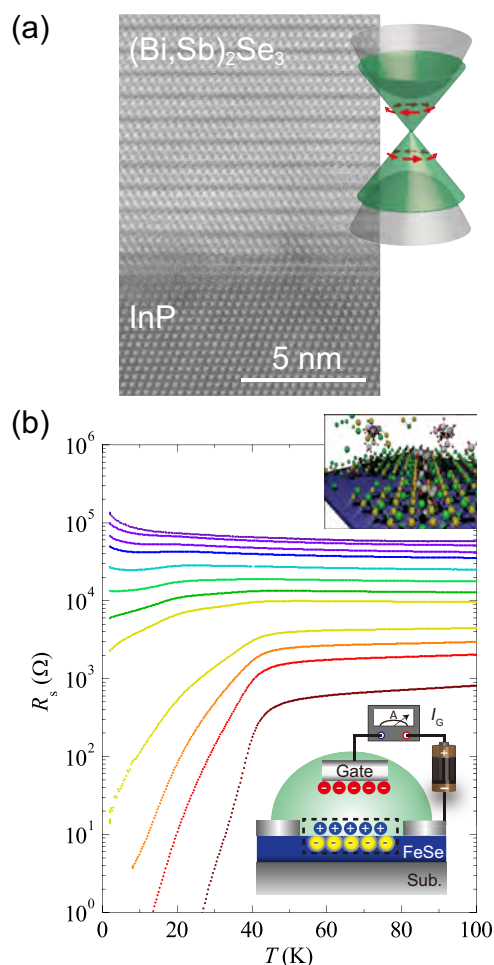


図 1. (a) トポロジカル絶縁体薄膜と電子状態。(b) FeSe 極薄膜における電界誘起超伝導とデバイス構造を用いた電気化学エッチング。

強相関電子物理学グループ

Strongly Correlated Electron Physics Group

藤森 伸一 教授 (客員)¹ 山本 浩史 教授 (委嘱)² 池本 夕佳 准教授 (客員)³

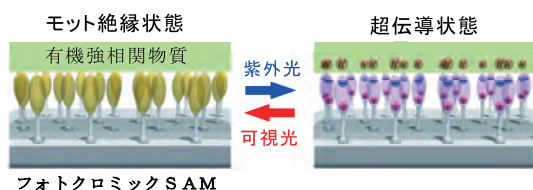
¹fujimori@spring8.or.jp ²yhiroshi@ims.ac.jp ³ikemoto@spring8.or.jp

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。

山本浩史：実は、有機化合物は強相関電子系の宝庫である。有機物を使って強相関電子系の物理をやるメリットはいくつもあるが、特に重要な点は、

- (1) バンド構造がシンプルで、より理論との比較がしやすい。
- (2) 格子系が柔らかいため、バンド幅を自由に制御できる。
- (3) 状態密度が低いため、少ない刺激で大きな応答を得られる。

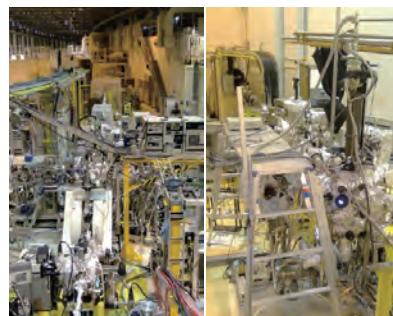
の3点が挙げられる。本研究グループでは、有機モット絶縁体と呼ばれる強相関電子系物質を用いて、新しい有機デバイスを作ること、そしてそのデバイス特性を測定することによって強相関電子の新たな一面を解明し、物性物理の基礎学理を深めることを目的として研究を行っている。例えば、有機モット絶縁体を用いて FET（電界効果トランジスタ）を作ると、低温においてゲート電圧や光照射で超伝導転移を起こすことができる。このメカニズムの詳細を今後さらに解析し、新しい物性物理の開拓と新しい電子デバイスの創出を目指す。



光による超伝導のスイッチング

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光源とした新たな分光装置の開発と強相関物質の分光測定を行い物性発現のメカニズムを解明する。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、ここで得られる赤外線は、高輝度・広帯域特性を持ち、通常の赤外分光とは異なる条件で測定を行うことができる。下図にビームラインの写真を示す。磁場・圧力・温度・雰囲気などの環境を制御し、近赤外～遠赤外の広帯域顕微分光測定が主力だが、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

表面物理グループ*

Surface Physics Group

須藤 彰三 教授*

江口 豊明 准教授*

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

E-mail: suto@surface.phys.tohoku.ac.jp

物質を小さくしていくと、どんな色になるのだろうか？構造は？電子状態は？こんな素朴な疑問を解くために、実験を行っている研究室です。現在は、原子1個1個がどのようにして結合するのだろうか？どのようにしてクラスターやナノ構造、そして物質を形成するのだろうか？という問題の解明に取り組んでいます。

固体の表面は、図1に示されるように、量子力学で学んだ波動関数が直接観察できる場所です。濃い丸、薄い丸がありますが、一つ一つがシリコン（Si）の波動関数（ sp^3 軌道）を観察したものです。この実験には、走査トンネル顕微鏡（STM）を用いています。表面の原子の波動関数とSTMの探針の波動関数の重なりによって生じるトンネル電流を利用して像を得ます。図2に示すゲルマニウム（Ge）が吸着したSi表面では、占有状態と空状態とで波動関数の空間分布が大きく異なる様子が見て取れます。これに対し、探針に働く力を検出する原子間力顕微鏡（AFM）では、表面の原子配列を忠実に反映した像が得られます。図2のAFM像と構造モデルを比べると、互いに良く一致しているのが分かります。このように、STMやAFMを用いれば、表面の電子状態や幾何構造を原子1個単位で評価することができます。

STMやAFMでは、探針と表面原子間の相互作用（引力と斥力）を利用して、原子1個1個を動かすこともできます。図3は、Si表面上に吸着した個々の銀（Ag）原子を任意に動かした例です。Aという文字が描かれているのが分かるでしょうか？この手法を応用して、任意の個数のクラスターを形成し、その電子的性質、磁氣的性質の研究を進めています。その色や構造、電子状態を観察するためには、電子エネルギー損失分光という方法を用いています。

さらに、「物理学の最先端の研究は、最先端の技術に直結する」ことに着目し、企業との共同研究も積極的に進めています。近年の半導体素子は微小化し数nmを制御する技術が求めら

れています。このスケールの素子では表面が重要な役割を果たし、我々研究グループで蓄積された物理と技術が役に立っています。

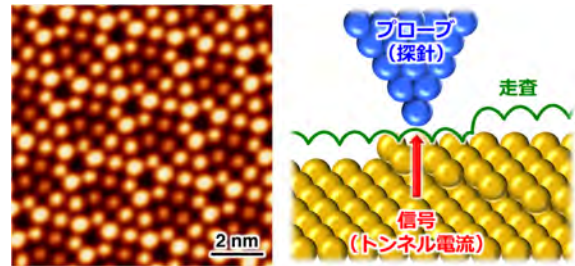


図1. シリコン表面のSTM像

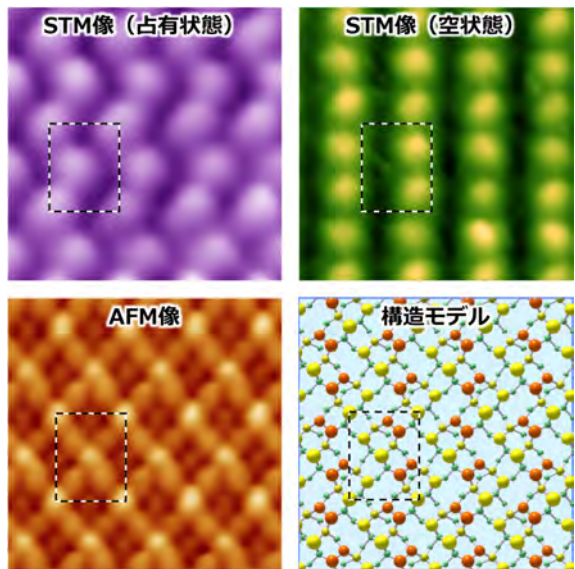


図2. Ge吸着Si表面のSTM像とAFM像

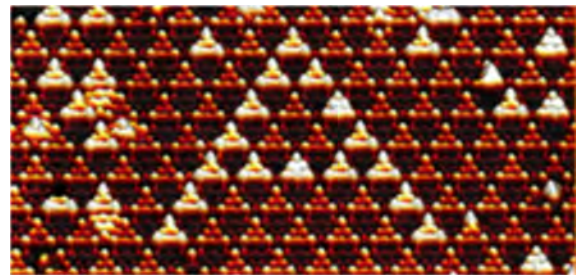


図3. 個々のAg原子の操作

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

宮田 英威 准教授*

大場 哲彦 助教

佐久間 由香 助教

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

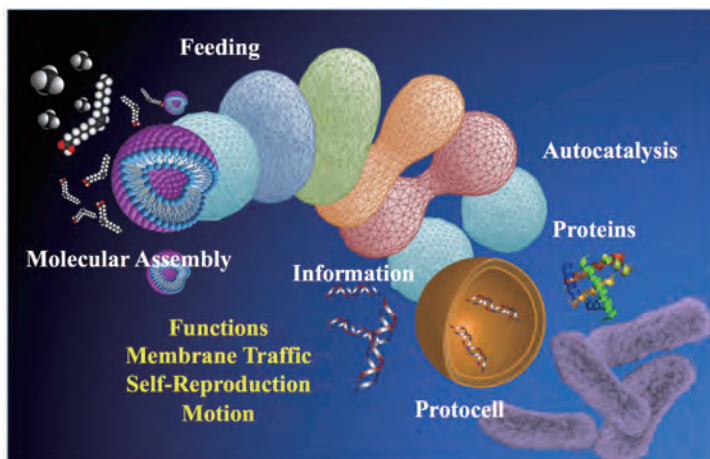
生物の持つ機能を物理の側面から解明することは、これからの物理学の中でも最も挑戦的な研究課題の一つです。そこでは個々の構成要素が連携して一つのシステムとして機能しており、非線形・非平衡現象の宝庫です。このような生命システムを物質科学を基本にして明らかにすることが当研究室の目的です。この目的に対して「ソフトマター物理」と「生物物理」の2つのアプローチにより迫っています。

ソフトマター物理的アプローチでは、細胞として最も基本的な機能である、1) モデル細胞膜（ベシクル）の自己生産、2) 遺伝情報分子、3) 代謝反応、が連携して動くシステム（ミニマルセル）をリン脂質などのソフトマターを用いて再現し、それによって物質からみた生命誕生を導く物理法則を明らかにしようとしています。特に、外部からのエネルギーを利用して分裂する（自己生産）ベシクル・外部の物質を化学変換して取り込み（代謝）成長するベシクルなどの研究を通して、生命機能の根幹をなす自己生産・代謝などの特質が誕生した謎を分子レベルから明らかにしてきています。さらに最近、情報高分子を利用したベシクルの成長・ベシクルダイナミクスの化学制御などの生命機能発現機構の解明・分子集合体の自己駆動現象・胚発生における形態形成など、生命

と物理を結びつける様々な分野にも挑戦しています。

「生物物理」的アプローチでは、生命の最小単位である細胞機能を理解するべく研究を行っています。細胞は、様々な機能、構造、サイズを持つ部品がマイクロ空間に高密度に収められたマルチスケールシステムです。このため細胞機能を構成要素の働きの総和として理解することはいまだに困難であり、現象論的アプローチが有効です。現在は電磁場に曝露された細胞や生体物質が示す応答を解明するというプロジェクトを進めています。これまでに 50 Hz 磁場に曝露された細胞の一酸化窒素産生が変化すること、DNA 鎖切断が促進されること、細胞死が上昇することを明らかにしています。

この分野は最近発展が著しいため、我々もアプローチに必要な方法論開発も行いながら研究を進めています。生化学や細胞生物学の知識も多少必要なので実験を行いながら身に付けられるように指導します。また、これらの生命現象を解明する実験装置の開発も行なっています。すでに、生体膜の軟らかさ（流動性）をリアルタイムで可視化するシステム、および試料のすべての偏光応答を可視化するミューラ行列顕微鏡を開発し、細胞のラフト構造や脂質二分子膜の動的構造の解明に利用しています。



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

松原 正和 准教授

大野 誠吾 助教

富田 知志 助教 (高教機構)

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

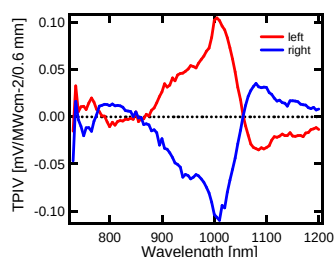
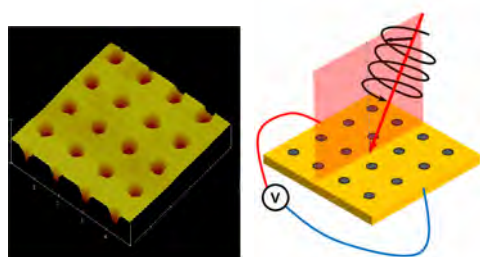
email: t-ishihara@tohoku.ac.jp

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



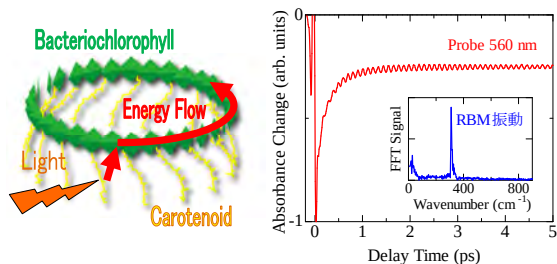
作製した金属フォトニック結晶の原子間力顕微鏡イメージ (上左) と光起電力測定配置図 (上右)。円偏光励起光起電力スペクトル (下)。円偏光の向きによって逆向きの起電力が発生する。

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。



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)。

量子伝導物性グループ

Solid-State Quantum Transport Group

平山 祥郎 教授* 遊佐 剛 准教授

橋本 克之 助教 Mohammad Hamzah Fauzi 助教 富松 透 助教

<http://quant-trans.org/jtop.html>

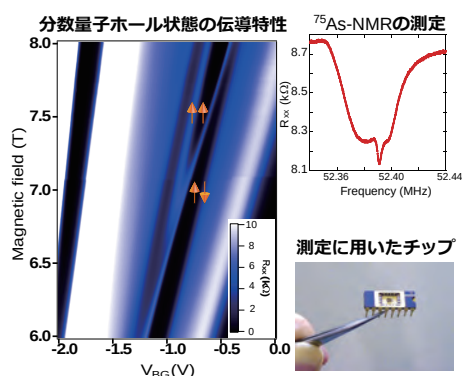
エレクトロニクス産業は半導体デバイスにより支えられています。ナノテクの進歩で線幅が100ナノメートルを切る半導体製品も出てきました。これらの半導体は工学上重要であるのみならず、物理を研究する上でも格好の舞台を提供してくれます。ナノスケールの半導体ではデバイスサイズが電子の波長程度の大きさになり、量子効果が顕著に表れ、新たな物理現象が現れてくることが予想されています。

当研究室では、そのような半導体を中心とした量子構造、ナノ構造の新しい物性をキャリア相関をキーワードに研究しています。二次元系ではキャリアのもつスピン、軌道、さらには谷自由度などの制御により多彩な量子ホール効果が実現しています。ゲート制御が難しいInSb二次元系の良好なゲート制御にも最近成功しました。一方で、主にGaAs系の半導体を用いて低次元構造に特徴的な物理現象の探索も進めています。細線構造、量子ポイントコンタクト、積層量子ポイントコンタクトは半導体ナノ構造の基本になるものであり、これらを用いて電子（スピン）の基礎的な制御の研究が進められています。

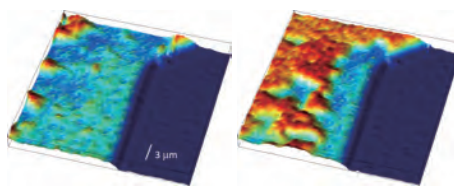
量子ホール領域では通常は表に出てこない半導体構成原子の持つ核スピンが大きく影響することもわかってきました。この相互作用は、核スピンをモニターとした電子のスピン状態の研究、ナノデバイスを用いた核スピンのコヒーレント制御、抵抗で検出する高感度NMRなどの成果に結びつき、高い評価を得ています。さらに、電気的手法のみならず、光学的手法を用いた核スピンと光の新しいインターフェースの創造にも注目しています。キャリア相関が重要な役割を果たす分数量子ホール効果や電子系と核スピン系の相互作用を光や電気ナノプローブを用いてミクロスコピックに測定する研究も進展しています。核スピンは化学、医学の世界ではNMR、MRIとして広く用いられており、これらを固体物性に応用することは核スピンを含む新しいスピン研究に道を拓くものとして期待されています。

半導体量子構造におけるこれらの物性研究

は、量子相関のコヒーレント制御を操るものであり、将来の固体量子コンピュータに繋がる研究としても大きな期待がもたれています。私たちはGaAs、InSb、カーボン系半導体、二硫化モリブデンの量子構造における新しい物性研究に挑戦します。なお、研究の一部はNTT物性科学基礎研究所など外部の研究機関と共同で行われています。



半導体分数量子ホール効果を用いたNMRの一例



分数量子ホール効果でのスピン相転移の実空間観察像。完全強磁性量子液体相（青い領域）と非磁性相（赤い領域）が共存している。



量子伝導特性の測定の様子
黄枠内は半導体量子構造作成に用いるプロセス装置の一例

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

現代の光科学は、物質の性質を調べるという従来の枠組みを超えて、光で新しい物質相を創り、制御する、よりダイナミックな領域へと広がりつつあります。これは超高速、大容量の光通信、光コンピューティングを目指す社会的要請（Society 5.0）に沿ったものです。本研究グループでは、従来の半導体などを対象とした光機能の研究の枠を超え、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」の世界を対象とします。極限的な赤外短パルス光（パルス幅～5 フェムト秒、フェムト秒＝千兆分の一（ 10^{-15} ）秒）やアト秒（アト秒＝百京分の一（ 10^{-18} ）秒）精度の干渉計など、世界最先端の光技術を駆使して、かつてない時間精度による測定を行います。電荷、軌道、スピン間の相互作用を数十アト秒～ピコ秒（ピコ秒＝ 10^{-12} 秒）のおおよそ5 桁に及ぶ時間軸ダイナミクス（エネルギー軸で 1 meV～数十 eV に対応）として解き明かし、次世代光機能のペタヘルツ（ 10^{15} ヘルツ）動作を目指します。

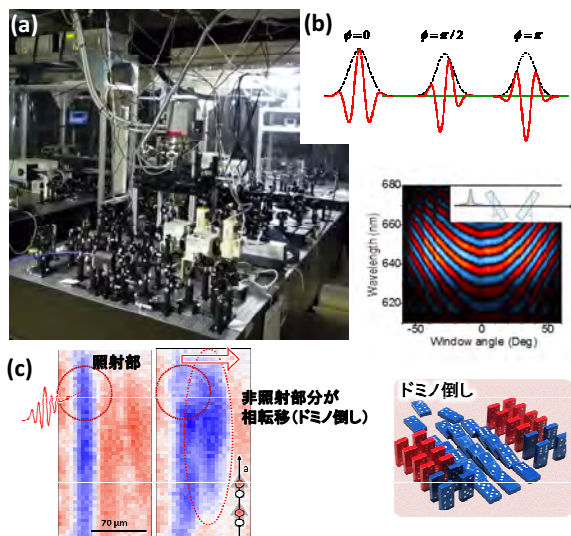


図 1. (a) 極短パルス光源と測定装置 (b) 光電場のキャリアエンベロープ位相制御 (c) 電子強誘電体における光ドメイン操作

(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、「光の超強電場が固体中の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。強相関電子系特有のフロケ（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。

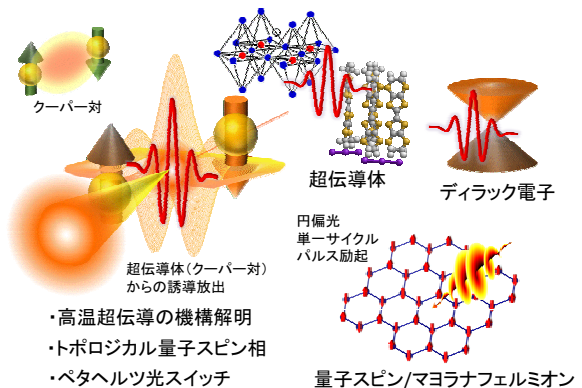


図 2. 量子多体物質における光強電場効果とアト秒光機能の開拓

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。

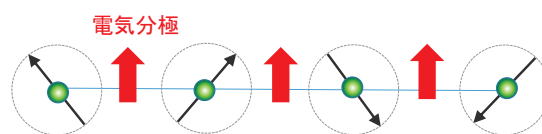


図1. 強誘電性を示す、らせん磁気構造

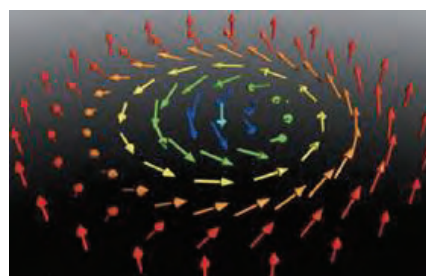


図2. トポロジカル磁気構造体スキルミオン

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 志賀 敬次 助教 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。

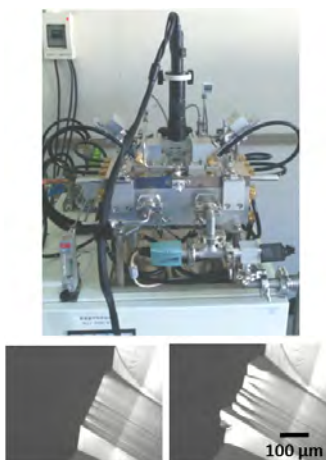
本グループでは、独自に“その場”観察装置を開発し、Si の融液成長メカニズムの解明と制御に関する研究を展開しています。本技術は、半導体材料だけでなく、各種化合物材料や金属材料など高融点材料の固液界面の観察にも適用できるため、融液成長の総合理解を目指して研究を発展させていきます。

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

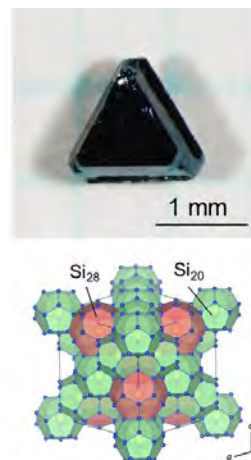
金属フラックスを用いた独自の結晶成長プロセスにより、新機能や高性能を示す新しい結晶材料の創製を目指しています。



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

<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に関わっていますが、原子レベルでの理解は進んでいません。表面物性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す。

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ます。そのため表面・界面には特有の物性や新たな機能が期待できるのです。私たちは、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ます。

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ます。開発したワイゼンベルグ反射高速電子回折法では、3次元的な表面構造を再生するために必要な大量のデータ

を、わずか数10分で測定できます。

機能を持った表面の創成と理解

電子エミッターや極限環境下で動作する半導体として有望なダイヤモンドの表面、優れた特性が期待されているグラフェン、h-BN、MoS₂などの2次元原子層物質などの電子状態や構造を調べて、様々なデバイスへの応用を目指しています。

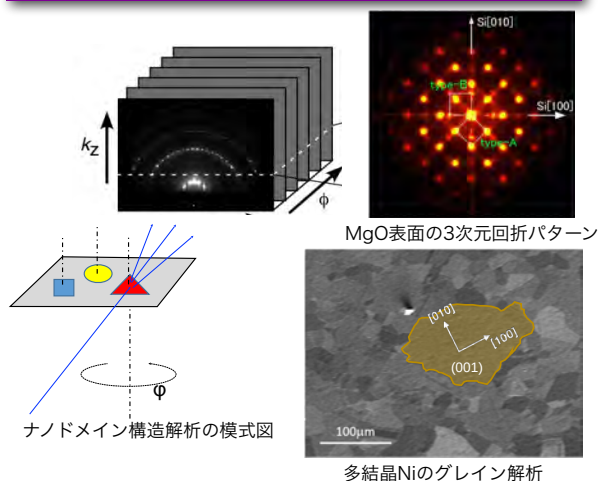
表面ナノドメインの理解

不均一な物質表面をナノレベルで計測するために光電子顕微鏡法 (PEEM) と走査電子顕微鏡法 (SEM) を使用しています。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を行います。

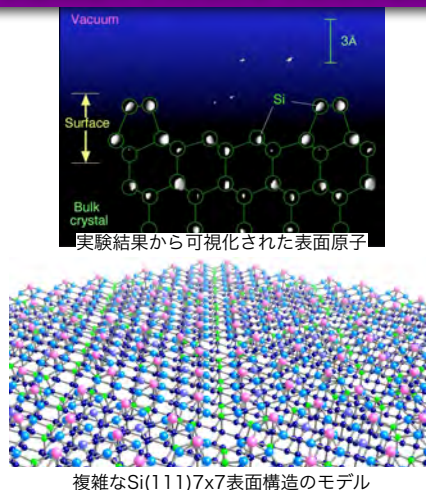
表面上の原子の動きを捉える

触媒反応ダイナミクスや構造相転移ダイナミクスを研究するために、ストリークカメラ電子回折法という表面原子の高速な動きを捉える新しい手法を開発しました。サブナノ秒から数ミリ秒という幅広い時間領域で、表面上の原子の動きを捉えることができます。

新しい手法の開発と新機能表面の創製



表面構造の3次元的な可視化と理解



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://www.tagen.tohoku.ac.jp/labo/tj_sato/

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。

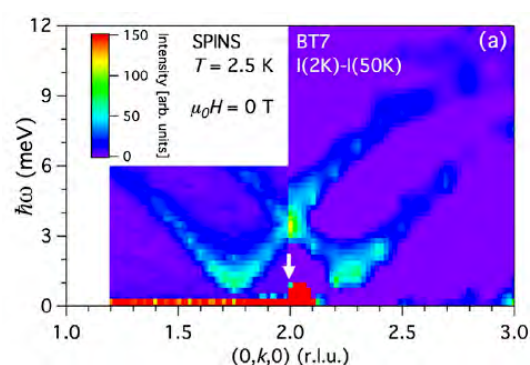
本研究室では、スピンダイナミクス測定に対する唯一無二の手段である中性子非弾性散乱を駆使して以下のような研究を行っています。

- ・ 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、反転対称の破れた反強磁性体 $\alpha\text{-Cu}_2\text{V}_2\text{O}_7$ におけるマグノン励起の測定結果を図に示します。マグノンとは磁性体中を波として伝搬するスピンの集団運動の量子（準粒子）です。反転対称を持つ反強磁性体では右巻きおよび左巻きマグノンは同じ速度で左右等方的に伝搬します。すなわち分散関係は原点に対して対称かつ2重縮退しますが、反転対称が破れるとこの縮退が解けるのですが、スピン振動の巻き方向に依存して左右伝搬に非対称性が現れるためマグノン分散関係は左右に分裂します。この結果原点ではマグノン分散の線形交差が現れるなど極めて興味深い現象を示すことが明らかになりました。



$\alpha\text{-Cu}_2\text{V}_2\text{O}_7$ 単結晶を用いて得られた低温でのマグノン分散関係測定結果。米国 NIST に設置された BT7 および SPINS 三軸型中性子非弾性散乱分光器で測定。

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://www.tagen.tohoku.ac.jp/labo/terauchi/index-j.html>

E-mail: terauchi@tagen.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トル ($1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$) 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~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

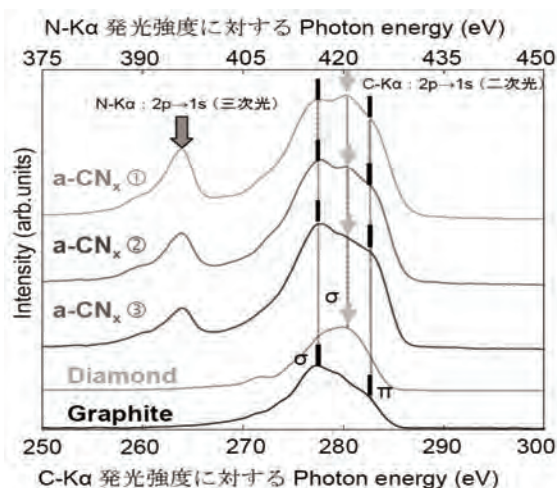
を行っています。

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。

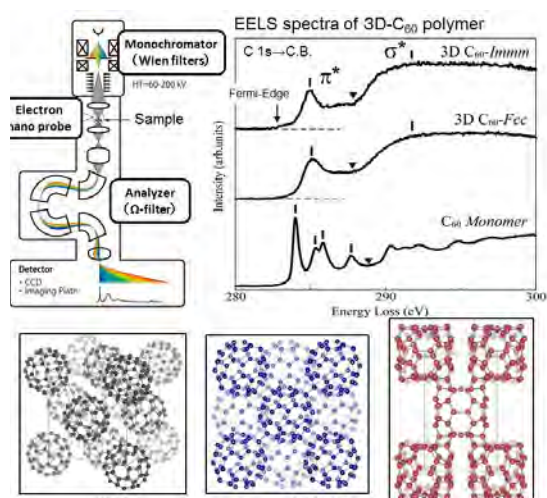
現在、次のようなテーマについて研究を行っています。

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. 遷移金属化合物における擬ギャップと結合状態変化の相関
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



C₆₀ および C₆₀ ポリマーから得た EELS スペクトルと構造モデル

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://db.tagen.tohoku.ac.jp/php/forweb/outline.php?lang=ja&no=4015>

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（高圧、高電場、高磁場、極低温）下での精密構造解析手法の開発。
3. 水素結合型誘電体や酸化物誘電体の相転移機構の解明。
4. 磁性体の磁気構造の解明、及びスピン密度分布の可視化。
5. 電気伝導物質（酸化物超伝導体や有機導体など）の相転移機構の解明。
6. 磁性と誘電性が共存した物質（マルチフェロイック物質）の相転移機構の解明。

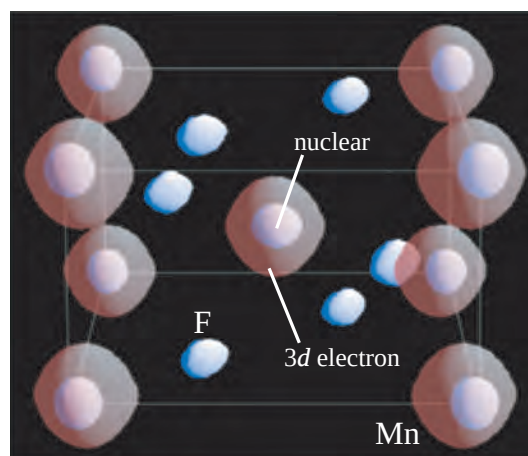


図. 単結晶を用いた精密結晶・磁気構造解析により得られた反強磁性体 MnF_2 の原子核密度分布（青丸）と Mn^{2+} スピン密度分布（赤丸）。赤丸は、 $3d$ 軌道を占有している電子スピンの空間分布を表している。

量子計測グループ

Quantum Sensing and Measurement Group

足立 伸一 教授（客員）¹ 大谷 知行 教授（客員）² 山口 浩司 教授（客員）³

¹ <http://pfwww.kek.jp/adachis/sa/index.html>

² <http://www.riken.jp/lab-www/THz-img/>

³ <http://www.brl.ntt.co.jp/group/butsuka-g/index-tohoku.html>

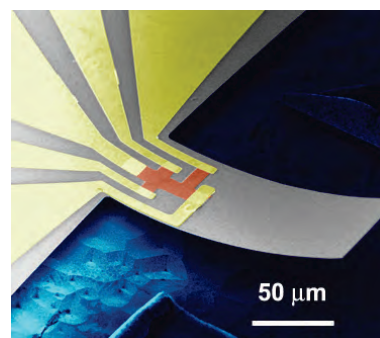
20 世紀前半、量子力学は自然界における微視的な現象を説明する新しい物理法則として生まれました。それから 100 年近くが経過した現在、実験技術は著しく進歩し、今や量子力学は単に自然現象を説明するという受身的な役割ではなく、電子や光子の振る舞いを極限まで制御し、量子的重ね合わせ状態を活用した量子コンピュータや量子センシングなどの革新的技術を生み出すキーコンセプトとして、極めて重要で能動的な役割を担うようになっていきます。量子計測グループでは、半導体や超伝導体などによるデバイス構造ならびに放射光 X 線を用い、電子や光子の量子力学的な振る舞いを明らかにし、革新技术として活用する研究を進めています。

量子計測グループのテーマのひとつは、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。光によって過渡的に現れる励起状態は、気相や液相中の孤立分子においては、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、固相の強相関系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は、過渡的な物質構造変化を実験的に捉えることが重要な課題となっています。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は、高エネルギー加速器研究機構（茨城県つくば市）において進められます。

もうひとつの研究テーマは、未開拓の光と呼ばれてきたテラヘルツ波の量子計測に関する研究です。テラヘルツ波（周波数 0.3–30 THz、波長 1 mm–10 μm ）は赤外線と電波の中間に位置する電磁波で、電波的な特性を活かした物

質透視や吸収スペクトルを用いた物質同定など様々な産業利用が期待されています。本テーマでは、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）や深宇宙探査といった超高感度宇宙観測ための超伝導量子検出器の研究開発を進めます。特に、微細加工技術を用いて検出デバイスを自ら作製して実験に利用します。この研究開発に加えて、フェムト秒パルスレーザーを用いたテラヘルツ光学（テラヘルツフォトンクス）に関する研究も進めています。以上のテーマは、理化学研究所テラヘルツ光研究グループ（仙台市青葉区）で行なわれます。

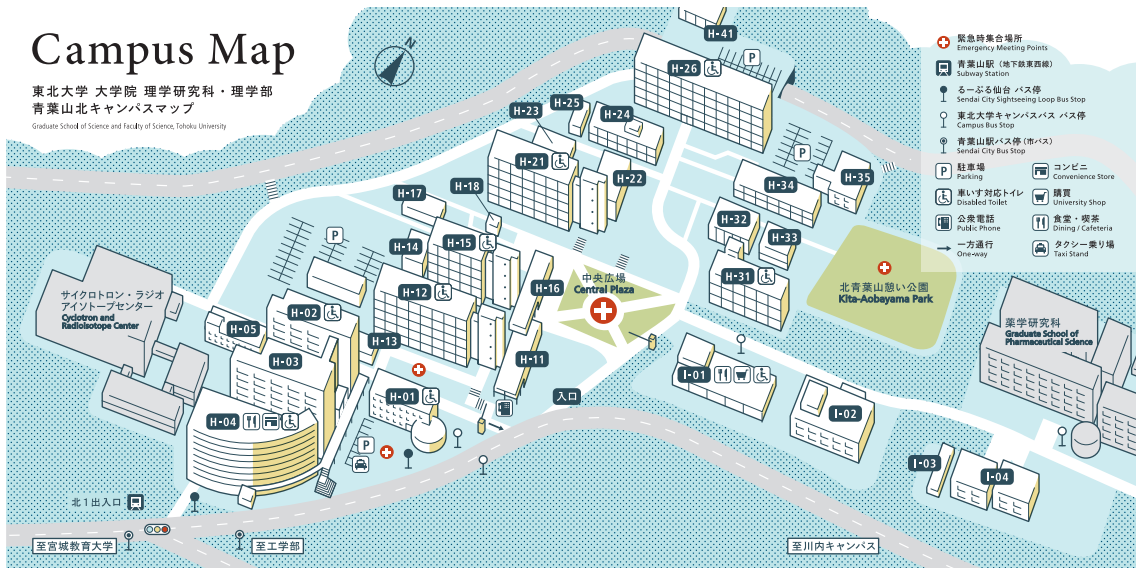
三つ目の研究テーマは、これまで検出できなかった「閉じ込められたフォノン」の量子力学的な振る舞いを調べることにあります。半導体によるフォノンの閉じ込め構造（右図例）のサイズがナノスケールまで小さくなり周波数が 1 GHz を超えると、量子力学的な調和振動子として振舞う可能性が指摘されています。このような人工構造物の巨視的量子状態は、シュレディンガーの猫に対応するものととらえられており、全く新しい量子物理の研究が発展する可能性があります。この研究は、NTT 物性科学基礎研究所（神奈川県厚木市）において進められます。



量子ホール素子を組み込んだフォノン共振器

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 機器開発研修棟
Machine Shop & Glass Laboratory | |

©Graduate School of Science, Tohoku University



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：

単一サイクル位相制御光の発生および測定装置：世界最先端の光技術を駆使して、電場振動が一周期に満たない極限的な短パルス光（～5 fs）を発生し、光の超強電磁場による次世代のフォトンクスを拓く。

東北大学大学院理学研究科物理学専攻 案内

発行	2019 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 物理学専攻 物理系専攻事務室
電話	022-795-6494
ファックス	022-795-6498
電子メール	kyomu@jimu.phys.tohoku.ac.jp
Web ページ	http://www.phys.tohoku.ac.jp/
