

# 東北大学大学院理学研究科 物理学専攻案内 2024

$$G(\alpha, \beta) = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \frac{\partial}{\partial \beta} \right) \ln Z[\alpha, \beta]$$
$$= \left\langle C_\alpha(t) C_\beta^*(\omega) e^{i \int L dt} \right\rangle_{0c.}$$
$$G_0(k, \omega) = (iG_0(k, \omega) - i\epsilon)^{-1} \frac{1}{V} \sum_{k'} \int \frac{d\nu}{2\pi} iG_0(k', \nu)$$

Department of Physics  
Graduate School of Science  
Tohoku University

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



東北大学

## 東北大学物理学教室の沿革

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

理学研究科合同棟



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

物理系研究棟（左）と物理・化学合同棟（右）



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

## 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員と大学院生に活用され、その高度な研究を支えています。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: 2023 国内 3 位) を得ています。

この優れた環境を用いて次世代の物理学を担う研究者の育成も私達の使命です。特に博士課程の学生には、国際共同大学院・卓越大学院・高等大学院・日本学術振興会などのプログラムから月額 20 万円前後の給付型の経済支援を行い、在学生の約 85%がこの支援を受けて研究に専念しています。

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

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

物理学専攻の Web ページ : <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、2009年より電子光理学研究センター、2024年より先端量子ビーム科学研究センターに改組）、高エネルギー物理学講座（ニュートリノ科学研究センター）、および核放射線物理学講座（サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター、2024年より先端量子ビーム科学研究センターに改組）が、また物性物理学分野では結晶物理学講座（金属材料研究所）、金属物理学講座（金属材料研究所）、分光物理学講座（多元物質科学研究所）が物理学専攻に加わりました。さらに連携大学院が新設され、東北大学以外の研究機関の研究者が本専攻の研究・教育に協力するようになりました。2007年には原子分子材料科学高等研究機構が発足し、その教員も物理学専攻の教育・研究に参加するようになりました。

現在、本物理学専攻は、基幹・協力講座、連携大学院合わせて約150名の教員により構成されており、国内外でも最大級の物理学教育研究組織になっています。

## 専攻への入学

本専攻の入学定員は、博士課程前期2年の課程（修士）が91名、博士課程後期3年の課程（博士）が46名です。博士課程前期2年の課程の選考試験は、一般選抜と自己推薦入試の2種類があります。一般選抜は8月下旬に行われます。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/](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) 2026年3月末までに定年となる教員(\*印)は、2025年度博士課程(前期)入学者の指導教員にはなれません。また2025年度入学者の指導にあたらぬ研究グループ名にも\*印を付しています。

注2) 教員名は、職位毎に姓の五十音順です。

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教員名	職位	掲載頁
素・核理論 Particle and Nuclear Theory	量子基礎物理学講座 Theoretical Nuclear and Particle Physics  <sup>1</sup> 学際科学 フロンティア研究所 Frontier Research Institute for Frontier Research Institute for Interdisciplinary Science	素粒子・宇宙理論 Particle Theory and Cosmology Group	すみの ゆきなり 隅野 行成	教授	12
			たかはし ふみのぶ 高橋 史宜	教授	
	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			
	なかやま かずのり 中山 和則	准教授			
	よねくら かずや 米倉 和也	准教授			
	きたじま なおや 北嶋 直弥	助教 <sup>1</sup>			
	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 <sup>1</sup>			
	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		
		こじょう とおる 古城 徹	准教授		
		よしだ だいすけ 吉田 大輔	講師		
		お の あきら 小野 章	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* これつね たかし 是常 隆 教授 しばた なおかず 柴田 尚和 教授 うちだ なりや 内田 就也 准教授 な す じょうじ 那須 譲治 准教授 いずみだ わたる 泉田 渉 助教 お の あつし 小野 淳 助教 タン フン Tuan Hung グエン Nguyen 助教 <sup>1</sup> 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		16
	金属物理学講座 Metal Physics  協力講座: 金属材料研究所 Institute for Materials Research	金研理論物理 IMR Theoretical Physics Group	のむら ゆうすけ 野村 悠祐 教授		18

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教員名	職位	掲載頁
素・核実験 Experimental Nuclear and Particle Physics	素粒子・核物理学講座 Experimental Nuclear and Particle Physics	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 ルカス ベルンス Lukas Berns 助教		19
		高エネルギー物理学講座 High Energy Physics	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 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 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 みやけ はるひこ 三宅 春彦 助教 わたなべ ひろこ 渡辺 寛子 助教	
	協力講座: ニュートリノ科学 研究センター Research Center for Neutrino Science <sup>1</sup> 高エネルギー加速器研究機構 素粒子・原子核研究所 Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK <sup>2</sup> 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 教授* み わ こうじ 三輪 浩司 教授 いちかわ ゆうだい 市川 裕大 准教授 いわさ なおひと 岩佐 直仁 准教授 かねた まさし 金田 雅司 准教授 み き けんじろう 三木 謙二郎 准教授 うかい みふゆ 鵜養 美冬 准教授 (兼任) <sup>1</sup> こいけ たけし 小池 武志 特任准教授 (兼任) <sup>2</sup> はやかわ しゅうへい 早川 修平 助教		23



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

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教員名	職位	掲載頁
物性実験 I Condensed Matter Experiment I	電子物理学講座 Condensed Matter Physics – Electronic Properties –	光電子固体物性 Photoemission Solid-State Physics Group	さとう たかふみ 佐藤 宇史	教授 <sup>1</sup>	29
			すがわら かつあき 菅原 克明	准教授	
	相関物理学講座 Strongly Interacting Many Particle Quantum System	極低温量子物理 Low Temperature Quantum Physics Group	そうま せいご 相馬 清吾	准教授 <sup>1</sup>	30
			なかやま こうすけ 中山 耕輔	助教	
			きむら のりあき 木村 憲彰	教授	
巨視的量子物性 Macroscopic Quantum Phenomena Group	大串 研也	教授	31		
		いまい よしのり 今井 良宗		准教授	
1材料科学高等研究所 Advanced Institute for Materials Research	微視的構造物性 Microscopic Structural Condensed Matter Physics Group	わかばやし ゆうすけ 若 林 裕助	教授	32	
		さいとう まき な 齋藤 真器名	准教授		
低次元量子物理 Low-Dimensional Quantum Physics Group	下谷 秀和	教授	33		
		いしい ゆうた 石井 祐太		助教	
			まつい ひろし 松井 広志	准教授	

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	スピントラップ物性 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 あかき みつる 赤木 暢	教授 准教授 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
強相関電子物理学講座 Strongly Correlated Electron Physics <sup>1</sup> 連携大学院: 分子科学研究所 Institute for Molecular Science  <sup>2</sup> 連携大学院: 日本原子力研究開発機構 Japan Atomic Energy Agency  <sup>3</sup> 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	けら さとし 解良 聡	教授 <sup>1</sup> (委嘱)	38	
		ふじもり しんいち 藤森 伸一	教授 <sup>2</sup> (客員)		
		いけもと ゆか 池本 夕佳	教授 <sup>3</sup> (客員)		

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教員名	職位	掲載頁
物性実験 II Condensed Matter Experiment II Experiment II	量子物性物理学講座 Quantum Condensed Matter Physics	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 さくま ゆか 佐久間 由香 くりすみのる 栗栖 実	教授* 講師 助教	39
	領域横断物理学講座 Soft Matter and Biophysics <sup>1</sup> 高度教養教育・学生支援機構 Institute for Excellence in Higher Education	超高速分光 Ultrafast Spectroscopy Group	いわい しんいちろう 岩井 伸一郎 かわかみ ようへい 川上 洋平 あまの たつや 天野 辰也	教授 准教授 助教	40
		量子ダイナミクス Quantum Dynamics Group	ゆ さ ごう 遊佐 剛 はしもと かつし 橋本 克之	教授 助教	41
		量子光学 Quantum Optics Group	かねだ ふみひろ 金田 文寛 よしざわ まさゆき 吉澤 雅幸 とみた さとし 富田 知志 まつばら まさかず 松原 正和 おおの せいご 大野 誠吾	教授 教授* 准教授 <sup>1</sup> 准教授 助教	42
	結晶物理学講座 Crystal Physics 協力講座: 金属材料研究所 Institute for Materials Research	スピン機能物質科学 Spin-Related Functional Materials Science Group	おの せ よしのり 小野瀬 佳文 にい よういち 新居 陽一 ますだ ひでとし 増田 英俊 いしだ こうすけ 石田 浩祐	教授 准教授 助教 助教	43
		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 まえだ けんさく 前田 健作 そう りちゅう 荘 履中	教授 准教授 助教 助教	44

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教員名	職位	掲載頁
物性実験 II  Experiment II	分光物理学講座 Solid State Spectroscopy	表面構造物性 Surface Structure Physics Group	あぶかわ ただし 虻川 匡司 やまもと はじめ 山本 孟	教授 助教 (兼任)	45
		スピ量子物性 Quantum Spin Physics Group	さとう たく 佐藤 卓 なわ かずひろ 那波 和宏 きんじょう かつき 金城 克樹 うーほんちえん Wu Hung-Chen	教授 准教授 助教 助教	46
		電子線ナノ物理 Electron Crystallography and Spectroscopy Group	てらうち まさみ 寺内 正己 さとう ようへい 佐藤 庸平 まつもと たかとし 松本 高利	教授* 准教授 助教	47
		結晶構造物性* Structural Physics and Crystal Physics Group	さとう たく 佐藤 卓 やまもと はじめ 山本 孟	教授 (兼任) 助教	48
	量子機能計測講座 Quantum Measurement and Functional Sensing  連携大学院: 理化学研究所 RIKEN	量子機能計測 Quantum Measurement and Functional Sensing Group	おおたに ちこう 大谷 知行	教授 (客員)	49

# 素粒子・宇宙理論グループ

Particle Theory and Cosmology Group

隅野 行成 教授 高橋 史宜 教授 山口 昌弘 教授

石川 洋 准教授 中山 和則 准教授 米倉 和也 准教授

北嶋 直弥 助教 堀田 昌寛 助教 山田 將樹 助教 山田 洋一 助教

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

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

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

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

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

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

といったものの解明は今後の課題です。

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

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

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

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

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

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

### (1) 高エネルギー現象の理論的研究

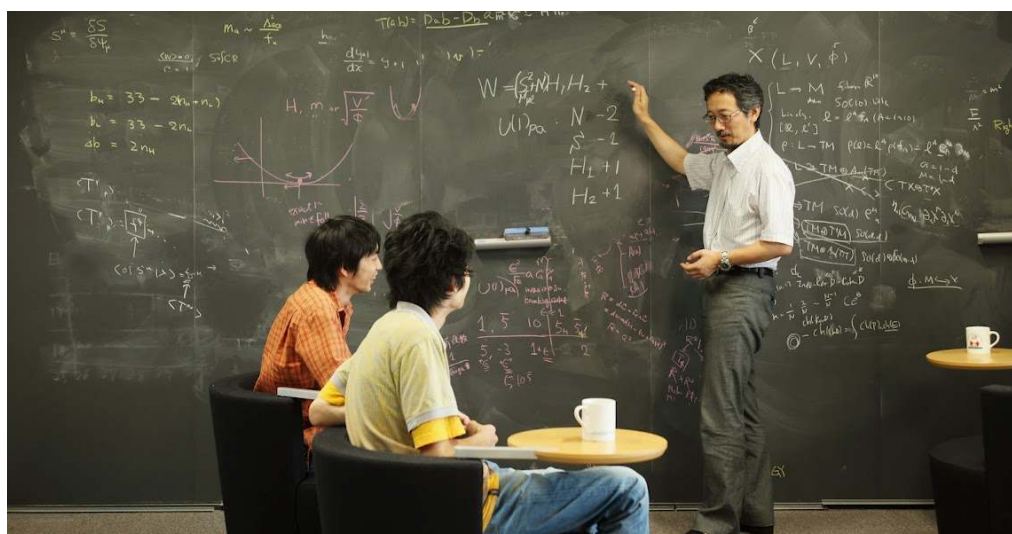
稼働中および計画中の加速器実験における素粒子現象、および様々な精密測定における新現象の出現についての理論的研究を行っています。

### (2) 初期宇宙の研究

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

### (3) 超弦理論や場の量子論の研究

超弦理論や場の量子論が持つ数理的な構造を解明するための研究を進めています。



# 原子核理論グループ

Nuclear Theory Group

肥山 詠美子 教授 佐々木 勝一 准教授 古城 徹 准教授

吉田 大輔 講師 小野 章 助教

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

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

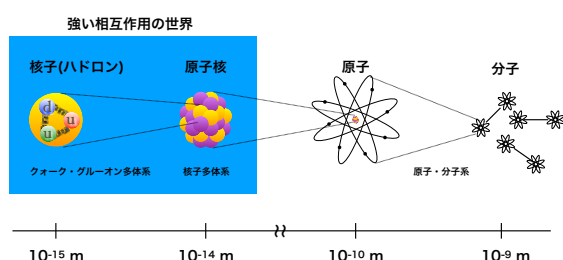


図1. 長さのスケールで見る階層性と強い相互作用の世界。

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

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

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

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

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

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

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

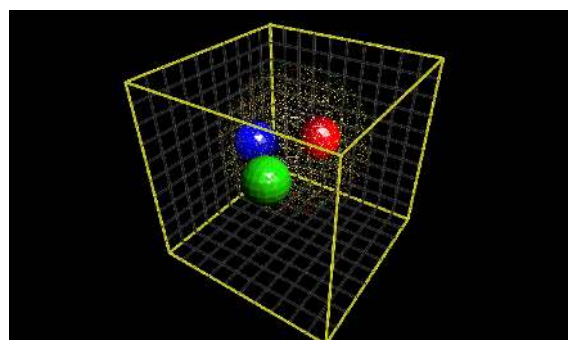


図2. 格子QCDのイメージ図（計算の便宜上、クォーク、グルーオンを格子状に配置して第一原理計算を行います）。



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

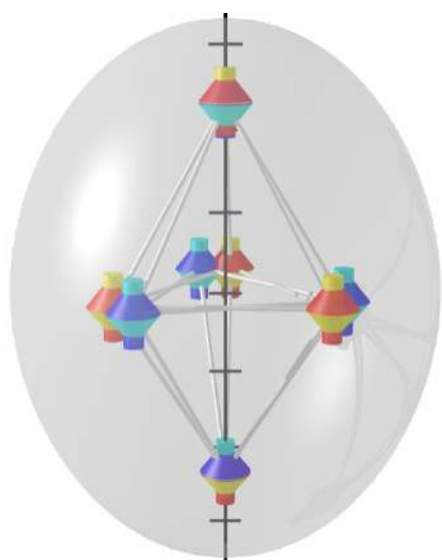


図3. 微視的理論で得られた、 $^{20}\text{Ne}_{10}$  核の最も確からしい核子（陽子：赤と黄、中性子：青と水色）の配置とスピンの向き。コア核を中心に上下に  $\alpha$  粒子のクラスター構造が形成されていることを示唆しています。

**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することが重要となります。

本研究室では、「無限小ガウス・ローブ基底関数」を用いたガウス展開法を独自に開発することで少数多体系の精密計算法を可能にし、原子核、ハドロン、原子分野に幅広く適用して

います。多体系の解法を信頼できるものとすることで、例えばハイペロンを含む多体系のスペクトルから正しいハミルトニアンを推定することが可能となります。少数多体系の問題は様々な分野で難しい問題として残されており、今後の研究展開が期待されます。

**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。本研究室では、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、核物質の状態方程式を複雑な核子間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。

特に、近年の中性子星観測の急激な進展に伴い、クォークに基づく状態方程式の記述が重要になってきます。我々は、ハドロン物理のこれまでの知見を活かし、核物質からクォーク物質への移り変わりを記述する理論を構築しています。

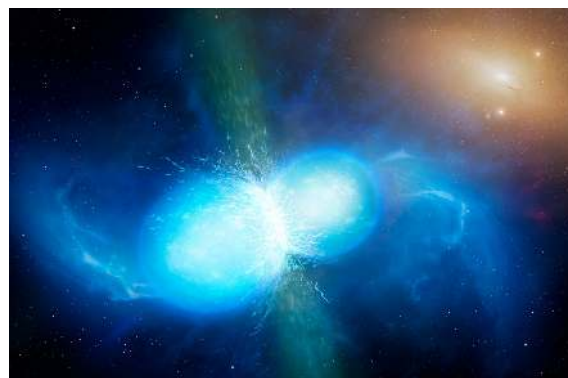


図4. 連星中性子星合体のイメージ図 (Image Credit: University of Warwick/Mark Garlick)。

**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\* 是常 隆 教授 柴田 尚和 教授

内田 就也 准教授 那須 譲治 准教授

泉田 渉 助教 小野 淳 助教 中島 龍也 助教

村島 隆浩 助教 横山 寿敏 助教 Tuan Hung Nguyen 助教

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

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

## 物性理論の目的

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

## 物性理論の研究対象

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

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

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

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

## 研究室の構成と特徴

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

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

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

本専攻には多くの物性分野の実験研究室があり、また、金研・多元研などの研究所とも協力関係にあります。今後も次世代放射光施設の建設に伴い、青葉山・片平地区内での密接した研究連携が期待できます。

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

### 各教員の現在のテーマ

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

**川勝 年洋** 高分子や界面活性剤等のソフトマテリアルにおけるメソスケール構造とその動力学の理論とシミュレーション。

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

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

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

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

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

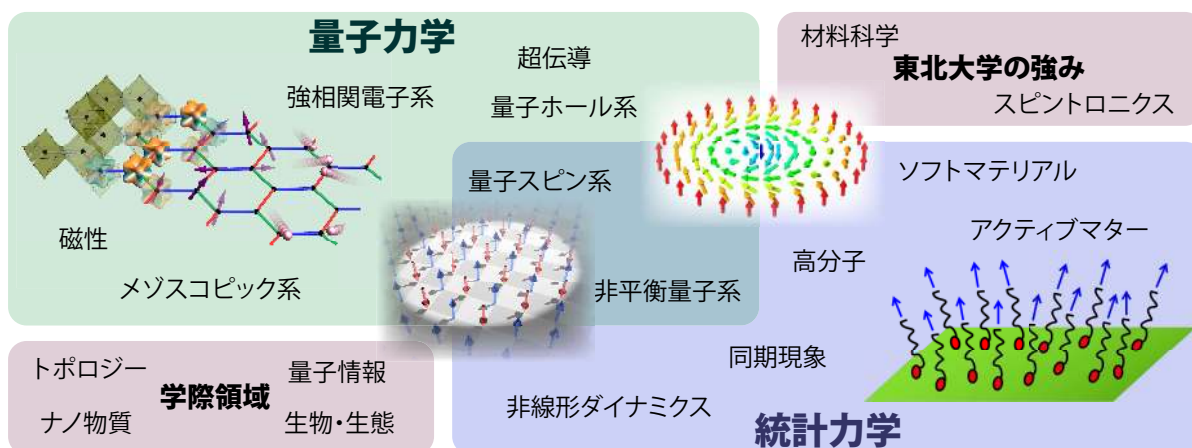
**小野 淳** 強相関電子系における光物性。特に光誘起相転移や超高速現象に関する理論的、数値的研究。

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

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

**横山 寿敏** 強い電子間相互作用が物性を支配する系の理論的研究。高温超伝導、金属絶縁体転移、磁性、有機伝導系、冷却原子気体など。

**Tuan Hung Nguyen** エネルギー応用を目指したマテリアルインテリジェンスの基礎理論とシミュレーション。特に熱電材料、固体電池、人工筋肉。



物性理論グループの研究テーマ。

# 金研理論物理グループ

IMR Theoretical Physics Group

野村 悠祐 教授

<https://sites.google.com/view/nomuragroup>

当グループは量子物性の理解と設計を目指す物性理論の研究室です。

**研究の目的:** 強い力により相互作用する素粒子を扱う素粒子物理から、クーロン力により相互作用する多電子系を扱う物性物理に至るまで、エネルギースケールに違いはあるものの、これらの分野には、強い相関をもつ量子多体系という共通点があります。量子性と多体性の兼ね合いによって生じる創発的な量子現象を理解することは、この世の成り立ちを解明することに他なりません。さらには、超伝導や磁性などの多彩な多電子系の量子現象がデバイス応用につながり得るという点で、物性物理は基礎物理上のみならず応用の観点からも重要な学問分野となっています。

当グループは、理論研究の立場から、物質の多様性を物質によらない普遍的な第一原理計算を用いて解析し、多様性の背後にある本質的な物理の解明を目指します。物性予測のための知見を積み重ねることで、理論物理学における新たな概念の創出につなげるとともに、理論主導の物質・物性設計という量子多体研究のフロンティアを開拓しています。

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

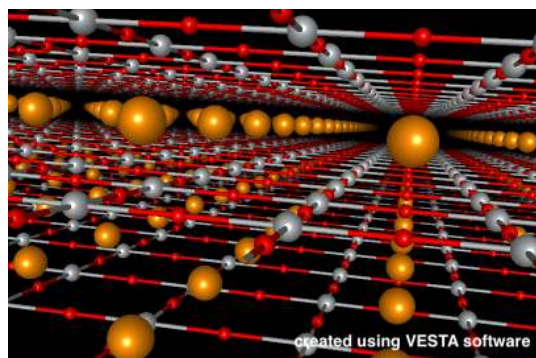
**研究内容:** 具体的な研究テーマをいくつか紹介します。

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

振る舞う非自明な創発現象（分数化）が両者をつなぐ普遍的な概念である可能性があります。このように多様な現象の中に潜む普遍性を探るのは物性物理の醍醐味の一つです。

- バンドエンジニアリング：例えば、層状物質において、各層を構成する元素の素性や構造を変更することによって物質のバンド構造を制御し（バンドエンジニアリング）、物質の機能を向上できる可能性があります。このテーマに関しては、層状ニッケル酸化物における超伝導物質候補の理論提案を行うなど物質設計の最前線を追求しています。
- 輸送・応答現象：ゼーベック効果や異常ホール効果などの輸送現象、非平衡状態における非自明な現象（光誘起超伝導など）を解析し、物性制御や新デバイス応用に向けた道を模索しています。

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



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

# 素粒子実験（加速器）グループ

Elementary Particle Physics (Accelerators) Group

市川 温子 教授      佐貫 智行 准教授      中村 輝石 助教      Lukas Berns 助教

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

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

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

## 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 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を結論付けるためには、もっとデータ量を増やし、また測定精度を上げる必要があります。そのため、ニュートリノビームの強度を上げるために必要な装置の開発、測定精度を上げるためのニュートリノ検出器の製作、新しいデータ解析手法の開発を行いつつ、データ取得を進めています。

スーパーカミオカンデは 5 万トンの水を用いてニュートリノを検出していますが、ハイパーカミオカンデ計画では、26 万トン水を有する検出器を新たに作り約 8 倍の効率でニュートリノを捉えます。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 対称性を破っているのか、破れているとしたらその大きさを決定することを目指します。

加えて、これらの実験ではニュートリノのフレーバーと呼ばれる種類と質量の関係を精密に測定します。またスーパーカミオカンデおよびハイパーカミオカンデでは陽子の崩壊を探します。フレーバーと質量の関係、そして陽子の崩壊は、（まだ未完成の）大統一理論への重要な情報です。

## ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索

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



図 1. T2K 実験の概念図。



図 2. AXEL プロトタイプ検出器。

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。今後、プロトタイプ検出器の6倍の大きさである 1,000 リットルの検出器を建設して岐阜県飛騨市神岡の地下で測定開始することを目指します。

### 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 20 km 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

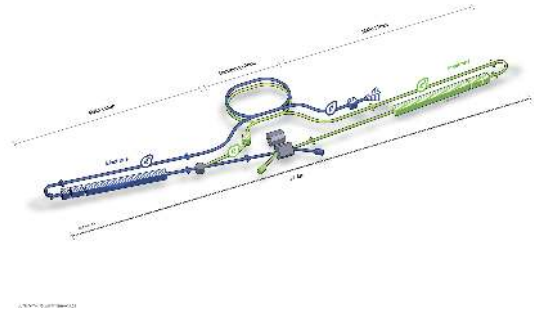


図 3. 国際リニアコライダーの概念図。

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。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。

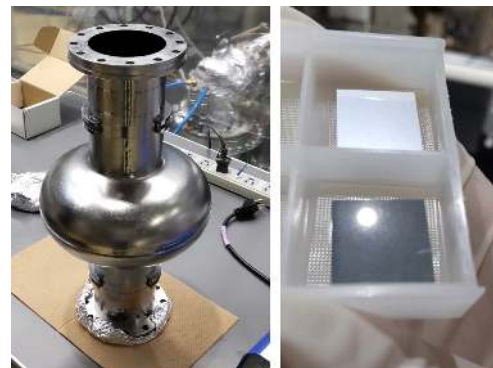


図 4. 開発中の加速管 (左) と加速管用超伝導体 (右)。

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しています。加えて、加速器の更なる性能向上を目指し、加速管に用いる材料や新しい製造方法の研究を進めています。

# 素粒子実験（ニュートリノ）グループ

Elementary Particle Physics (Neutrino) Group

井上 邦雄 教授 岸本 康宏 教授

石徹白 晃治 准教授 古賀 真之 准教授 清水 格 准教授

池田 晴雄 助教 市村 晃一 助教 三宅 春彦 助教 渡辺 寛子 助教

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

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

## 非加速器素粒子実験

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

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

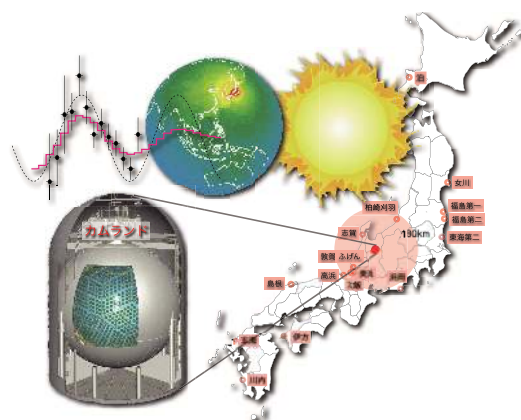
## カムランド実験

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

この検出器によって原子炉からの反電子ニュートリノ観測を行い、ニュートリノの見かけの数が距離とともに減少・復元を繰り返す

ニュートリノ振動を2サイクル以上にわたって捉え、30年以上未解決であった太陽ニュートリノの謎を解決するとともに、ニュートリノ振動パラメータの精密測定を達成しました。

また、地球内からのニュートリノの観測にも世界で最初に成功し、ニュートリノをプローブとして利用した地球内部の観測「ニュートリノ地球物理」を切りひらきました。このニュートリノは地球内部の放射性物質が崩壊する際に熱と共に放出するものであり、その観測で得られる情報は地球内放射化熱量に焼き直すことができ、更に地球形成・発展の研究、地磁気生成、マントル対流といった地球ダイナミクスの研究への展開が期待されています。

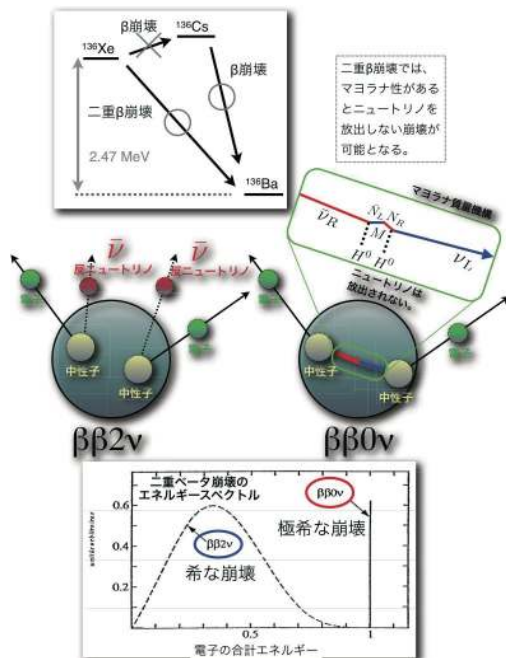
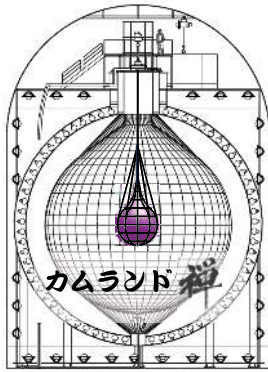


今では、カムランドの観測精度向上により地球内熱量に占める放射性物質起源の熱の寄与の割合を検証できるようになってきていますが、特に停止している国内原子炉が多い現状は地球ニュートリノ観測の精度向上に適しており、急速な発展が見込まれます。さらなるニュートリノ利用の実践として、太陽ニュートリノ観測による太陽内部の直接観測とそれによる恒星進化の究明、超新星爆発ニュートリノの観測による宇宙の進化の研究、重力波望遠鏡

と連携したマルチメッセンジャー宇宙観測なども推進します。

### カムランド禅実験

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



ニュートリノレス二重ベータ崩壊の研究は、ニュートリノと反ニュートリノの同一性（マヨラナ性）を調べる現実的な唯一の研究手法で

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

今後も競合実験をリードし続けるには、検出器の高性能化が必要です。改良計画の「カムランド2」では、検出できる光量を増加させエネルギー分解能の向上によるバックグラウンドの更なる低減を目指し、高光収集液体シンチレータ、光量子効率光センサー、集光ミラーの導入を予定しています。ニュートリノレス二重ベータ崩壊事象の発見に向けて実験開始の準備を進めています。

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

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

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



# 原子核物理グループ

Experimental Nuclear Physics Group

田村 裕和 教授\* 三輪 浩司 教授

市川 裕大 准教授 岩佐 直仁 准教授 金田 雅司 准教授 三木 謙二郎 准教授

鵜養 美冬 准教授 (兼任) 小池 武志 特任准教授 (兼任) 早川 修平 助教

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

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

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

## 1. ストレンジネス核物理

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

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

(1)  **$\Lambda$ ハイパー核 $\gamma$ 線精密分光、 $\Xi$ 原子X線分光:** 我々は自ら開発した大型半導体検出器群(図1)を用いて $\Lambda$ ハイパー核からの $\gamma$ 線を精密に測定し、その詳細なエネルギー構造を次々と明らかにしてきました。現在、この $\gamma$ 線分光の手法を用いて、 $\Lambda$ ハイパー核での荷電対称性の大きな破れの謎を解明する実験や、 $\Xi^-$ 粒子が原子核に束縛した $\Xi$ 原子のX線を世界で初めて測定して $\Xi$ と核子に働く力を調べる実験を進めています。

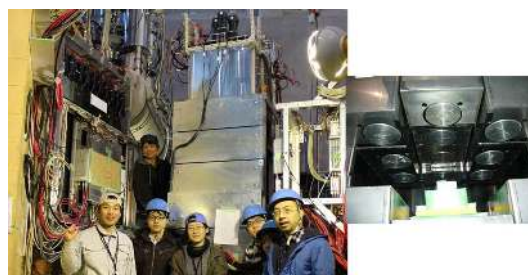


図1. ハイパー核 $\gamma$ 線が精密に測れる世界唯一の装置Hyperball-Jとその開発メンバー(左)、および、Hyperball-Jの心臓部(右)。

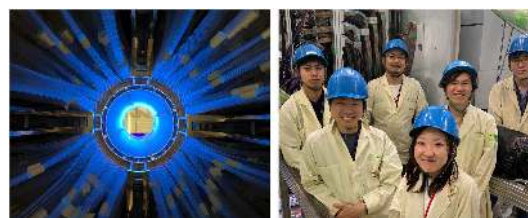


図2. 我々が開発しJ-PARCでのハイペロン・陽子散乱実験に用いた円筒型ファイバー検出器(左)と、実験メンバー(右)。

(2) **ハイペロン・陽子散乱実験:** 我々はJ-PARCの大強度中間子ビームと自ら開発した高速時間

応答の検出器 CATCH (図 2 左は CATCH 内のファイバー検出器) を用いて、世界で初めてシグマ ( $\Sigma$ ) 粒子と陽子の散乱微分断面積の高精度測定に成功しました。現在、 $\Lambda$  粒子と陽子との散乱実験を SPring-8 および J-PARC で計画しており、その準備を進めています。この相互作用の研究は、中性子星内でのハイペロンの出現シナリオを解明する鍵となっています。

(3) **エキゾチックハドロンの研究:** ストレンジクォークを 2 つ含んだ 2 粒子系では相互作用が強い引力となり、H ダイバリオンと呼ばれる 6 クォーク状態が形成されると予想されています。大立体角飛跡検出器 HypTPC を用いて H ダイバリオン探索実験を行い、その解析が進んでいます。さらに、この HypTPC を用いた 2 粒子共鳴の研究から様々なバリオン間、バリオン-中間子間の相互作用や共鳴の性質の解明を目指した実験を進めています。

(4) **光子ビームによるストレンジネス生成実験:** 本学電子光理学研究センターの 1.3 GeV 電子加速器にて、我々の開発した NKS2 スペクトロメータを用いた中性 K 中間子光生成研究を推進、さらに  $\Lambda n$  終状態相互作用といった新実験を準備しています。

## 2. 短寿命核物理

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

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

本研究グループでは原子核実験を通して、

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

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

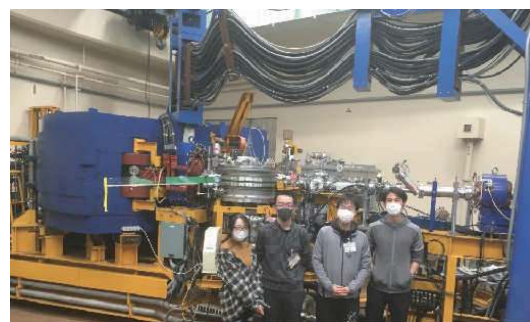


図 3. 原研タンデムで行った実験で使用した磁気分析装置 ENMA。

## 3. エキゾチック核と核力の物理

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

特に近年力を入れているのが、中性子のみからなる「原子番号ゼロ」の原子核系 (多中性子系) の探索です。中性子間にはクーロン斥力が働かないこともあり、中性子のみから構成される (準) 安定構造が存在し得るのではないかと注目を集めています。この研究は開放量子系の物理学という新しい分野にも繋がり非常に面白く、実験・理論の双方から進めてゆくことが求められています。我々の中性子過剰原子核生成技術を最大限に生かして、こうした極限状態の新しい原子核の生成に挑戦しています。またエキゾチック核を糸口として、核融合・核分裂の研究への展開も視野に入れています。それと並行して、独自の原子核スピン整理技術・測定技術を駆使し、エキゾチック核の構造を支配する核力の解明も力強く推進しています。

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

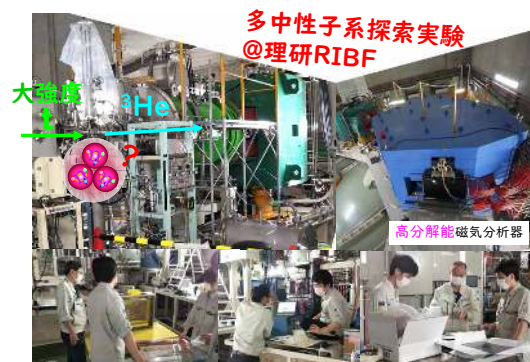


図 4. 理研 RIBF において世界最高感度で実施している多中性子系探索実験の様子。

# 原子核理学グループ

Nuclear Science Group

大西 宏明 教授    須田 利美 教授\*    村松 憲仁 特任教授  
柏木 茂 准教授    菊永 英寿 准教授    日出 富士雄 准教授  
時安 敦史 助教    本多 佑記 助教    松村 裕二 助教  
宮部 学 助教    武藤 俊哉 助教    横北 卓也 助教

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

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



1.3 GeV 電子シンクロトロン（BST リング）

## クォーク核物理

クォーク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しています。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  $\Theta^+$  の発見は新たなハドロン形態として世界的な話題となりました。クォーク核物理研究グループは、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 ( $\eta$ ) 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ました。また重水素標的において中性  $\pi$  中間子2つを終状態にもつデータの解

析から6つのクォークからなる新粒子状態（ダイバリオン）の存在の証拠を捉えました。この他に、ハドロン間相互作用の研究などを推し進めています。この研究のために、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、さらに超前方に散乱された核子を捕捉するための超前方スペクトロメータ BLC を完成させました。



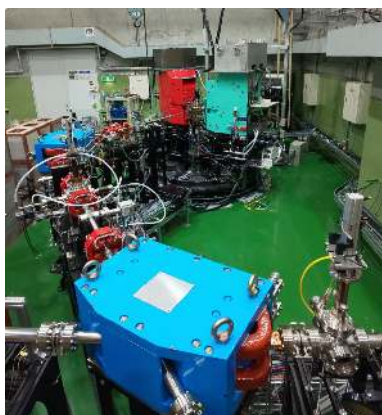
稼働中の2つの電磁カロリメータ

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、多彩な様相を呈しています。我々はこの「QCD 真空」を、その相互規定的である「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ます。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へ移設しました。既に得られたデータから身近な高密度状態である原子核内部（1 cm<sup>3</sup> 当たり約1億トン）で生成された  $\eta'$  の崩壊を BGOegg で捉えることで  $\eta'$  粒子の性質変化の徴候を捉えることに成功しました。現在は更なる精度向上をめざし、ビーム強度増強と前方カロリメータの建設を行っています。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ます。

## 電子散乱による原子核研究

1) 陽子の大きさ（半径）の精密測定

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



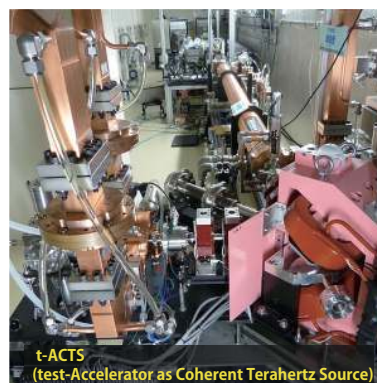
## 2) 短寿命なエキゾチック原子核の構造

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

### 加速器科学・ビーム物理分野

加速器科学・ビーム物理学の分野では、荷電粒子と電磁場あるいは光子との相互作用と集団運動の動力学や、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ます。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われており、リナックにおいては、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の研究が進められています。この他、試験加速器（t-ACTS）においては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ます。



また他機関との共同研究としては、KEKなどと小型加速器用超伝導加速空洞の開発に向けた研究や、海外ではチェンマイ大学（タイ）や精華大学（台湾）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線生成研究なども進めています。

### 核・放射化学分野

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

# 核放射線物理グループ

Nuclear Radiation Physics Group

伊藤 正俊 教授 寺川 貴樹 教授

足立 智 助教 岩本 ちひろ 助教

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

Email: itoh@cyric.tohoku.ac.jp

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

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

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

応用核物理学研究部では、サイクロトロンからの高エネルギーイオンビームを用いた照射技術と形成された3D線量評価技術の開発、大強度ビームの核反応による熱/熱外中性子ビーム生成(小型加速器中性子源)及び高精度照射技術開発、さらには工学研究科との共同研究で室温動作可能な高分解能・高検出効率の臭化タリウム半導体検出器を開発し、原子核物理、粒子線治療やホウ素中性子捕捉療法に関する先進的な医学物理研究など、基礎から応用にわたる幅広い分野の研究を推進しています。

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



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

# 加速器科学グループ

Accelerator Science Group

金正 倫計 教授 (客員)

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

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



図 1. 大強度陽子加速器施設 (J-PARC)。

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

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

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

きな影響を与えるため、エミッタンス向上に関する研究がテーマの一つです。

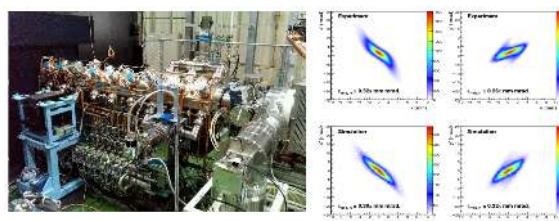


図 2. 高周波四重極型リニアック; RFQ とビームエミッタンスの測定値及び計算値。

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

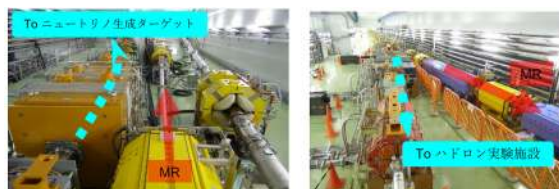


図 3. 主リングシンクロトロン (MR) のビーム取り出し部の写真。

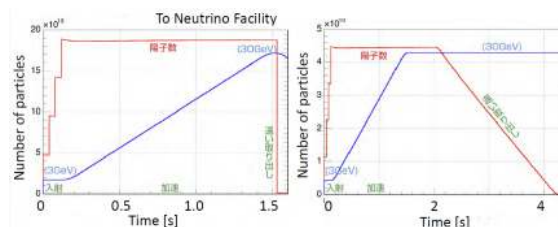


図 4. 主リングシンクロトロン (MR) から取り出されるビームのパターン。左図はニュートリノ施設へのビーム取り出し。3 GeV で入射されたビームが 30 GeV に加速され、一気にニュートリノ施設へ取り出されます (速い取り出し)。右図は、ハドロン施設へのビーム取り出し。3 GeV で入射されたビームが 30 GeV に加速され、長い時間 MR を周回しながら、徐々にハドロン施設へと取り出されます (遅い取り出し)。

# 光電子固体物性グループ

Photoemission Solid-State Physics Group

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

中山 耕輔 助教

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

## 1. はじめに

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

## 2. 研究内容

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

- (1) 新型ナノスピン ARPES 装置の開発と、スピントロニクス関連物質における電子構造の解明

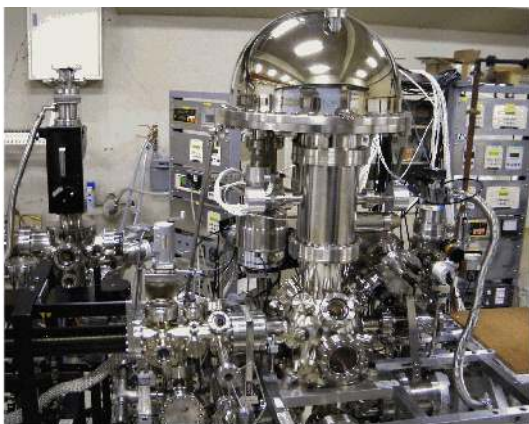


図 1. 東北大学に建設した世界最高水準のエネルギー分解能を有する ARPES 装置

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

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

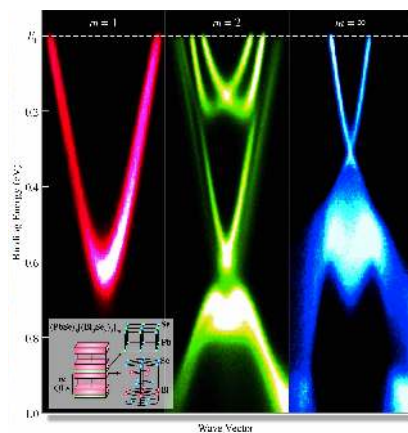


図 2. 角度分解光電子分光で決定したトポロジカル絶縁体超構造のバンド分散

# 極低温量子物理グループ

Low Temperature Quantum Physics Group

木村 憲彰 教授    水上 雄太 准教授    壁谷 典幸 助教

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

Email: kimura@mail.elts.tohoku.ac.jp

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

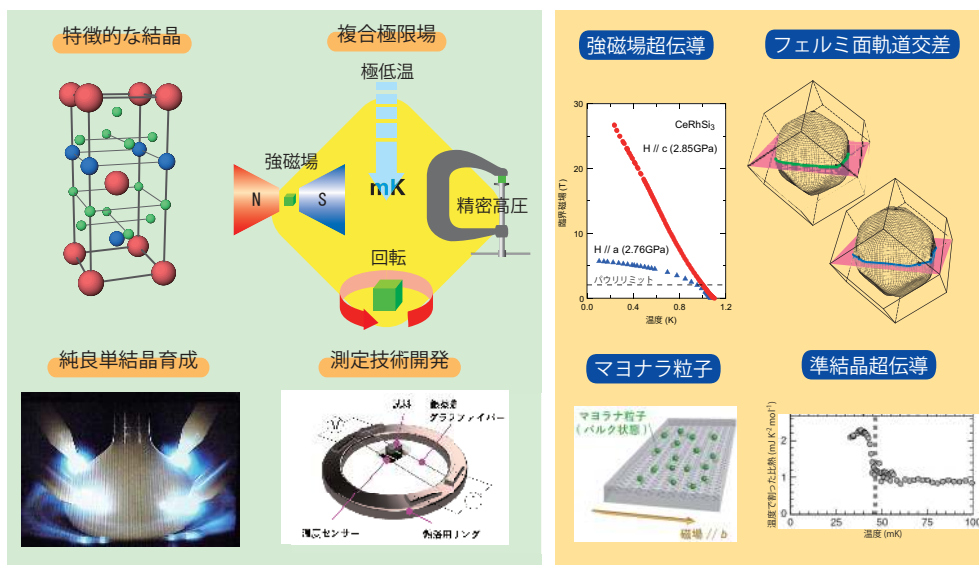
現在本研究グループが取り組んでいる研究テーマは以下のとおりです。

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

質を探索し、スピン軌道相互作用によって発現する新しい超伝導特性を明らかにします。

- (3) トポロジカル量子相：トポロジカル超伝導体やトポロジカル磁性体における非自明な電子状態の解明と新規な物性の開拓を極低温精密測定を通して行います。
- (4) フラストレートした量子スピン系：スピンの非可換性を顕在化させるフラストレーション効果を希土類化合物やスピン軌道モット系において実現し、新たな性質を持つ量子スピン系および準粒子励起の開拓を行います。
- (5) 準結晶の特異物性：フラクタル性を持つ準結晶の特異な超伝導状態や量子臨界性を、極低温測定により明らかにします。

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



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



# 巨視的量子物性グループ

Macroscopic Quantum Phenomena Group

大串 研也 教授      今井 良宗 准教授

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

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

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

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

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

現在は、以下のテーマに関する研究を集中的に進めています。

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

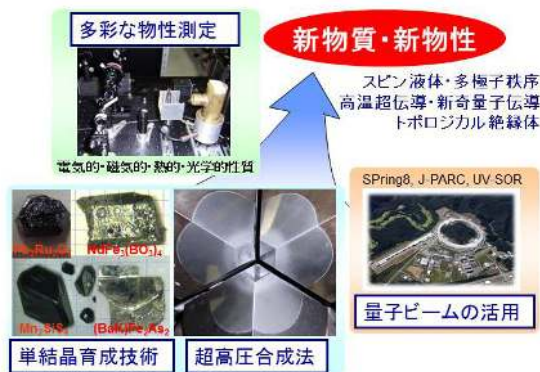


図 1. 研究の概念図。

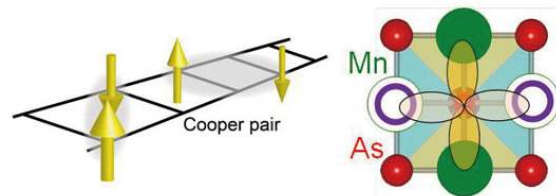


図 2. 梯子格子における超伝導 (左) と磁気四極子秩序 (右)。

# 微視的構造物性グループ

Microscopic Structural Condensed Matter Physics Group

若林 裕助 教授    齋藤 真器名 准教授    下谷 秀和 准教授    石井 祐太 助教

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

物質の様々な性質は、その構造と直接・間接に結びついています。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ます。原子間の相互作用までさかのぼって考える事で、観測した微小な構造変化から、物質中で生じている現象を読み解きます。

測定手法は主に図1のような装置による放射光を用いた回折・散乱法で、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す。これにより、乱れが本質的に重要な系、あるいは結晶格子の周期性が破れた界面での創発物性に関する研究を進めています。

試料は共同研究者からの供給を受け、我々は測定・解析と、それに基づく解釈に集中することで、様々な物質に対する研究を並行して進めています。具体的には、(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、磁気イメージング)、(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ます。

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



図1. KEK PF BL-4C の四軸回折計。

測定に用いる回折・散乱の理論は確立していますが、完全な計算を行うには計算負荷が高すぎるため、常に近似を行う必要があります。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います。

最近では表面・界面の構造解析に情報科学を活用する手法を開発しました (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ました。これに限らず、動的な磁気イメージングや時空間相関の限界を広げ、構造に基づく物性物理の地平を広げています。

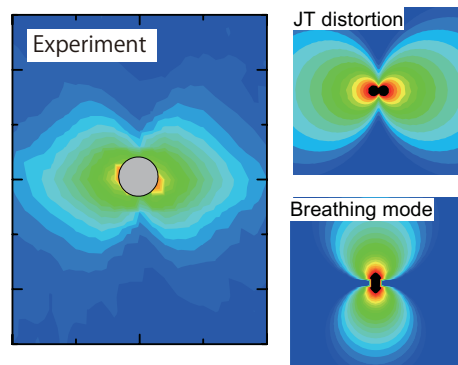


図2.  $\text{Ba}_3\text{CuSb}_2\text{O}_9$  の軌道液体に対応する X 線散漫散乱強度分布。左：実験、右：異なるモードの歪みによるモデル計算強度。

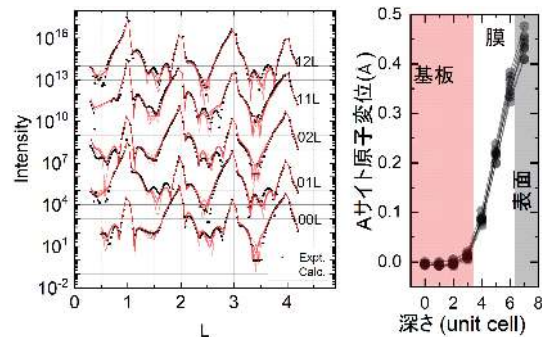


図3. モンテカルロ法による金属酸化物界面構造のベイズ推定の途中経過。(左) 散乱強度、(右) 金属サイトの変位量の深さ依存性。

# 低次元量子物理グループ

Low-Dimensional Quantum Physics Group

松井 広志 准教授

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

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

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

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

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

現在力を注いでいる課題として、以下の項目があります。

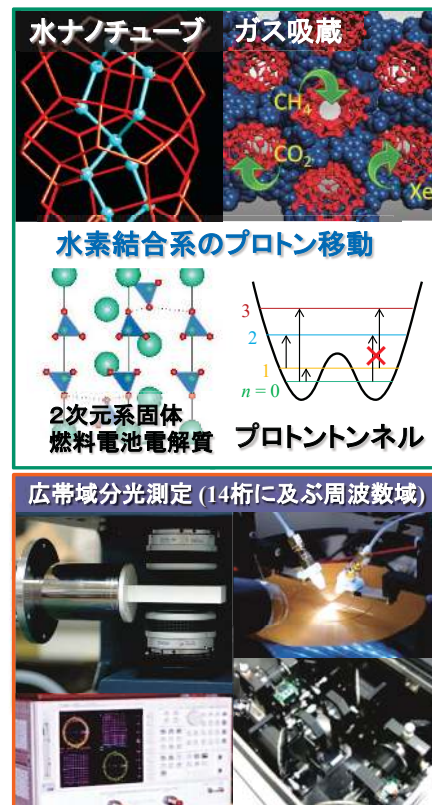
- (1) 超プロトン伝導体 ( $\text{Cs}_3\text{H}(\text{SeO}_4)_2$  など) の超広帯域伝導特性とプロトン輸送機構の解明。
- (2) 水ナノチューブにおける Xe、メタンガス吸蔵の探索、及びプロトン伝導性の抑制効果の研究。
- (3) コラーゲン、及びキチンフィルムの水和状態とプロトン伝導性、さらに燃料電池電解質としての機能性の研究。

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

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

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

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



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

## はじめに

電子が凝集し互いに強く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になっています。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相関（ダイナミクス）を知ることが肝要です。

本研究室では、中性子散乱と放射光 X 線、ミュオンといった量子ビームを駆使し、動的相関の独自研究を行っています。また、試料合成の環境を整え、日々新しい物質の探索にも取り組んでいます。

## 研究内容

### 1. 超伝導発現機構

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ダイナミクス測定を行います。理論計算との協働も行い、超伝導機構の解明を目指します。

### 2. 重い電子系化合物における量子臨界現象

圧力下物性実験と量子ビーム実験により、量子臨界現象を研究しています。超伝導と共存、競合する磁気相関の特徴を解明します。

### 3. スピントロニクス基盤物資のスピン揺動

電荷だけでなくスピンも利用したデバイスが注目されています。効率的なスピン流の生成と制御を目指して、スピントロニクス基盤物資のスピンダイナミクスを微視的に解明します。

## 本研究室の特徴

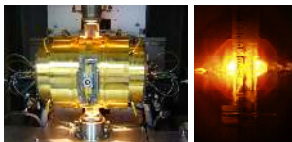
物性測定に必要な良質の試料を自作できることは研究の強みです。新物質合成から新しい研究が広がることもあります。本研究室では、多様な方法で試料合成を行います。

また、国内最大級の中性子物性科学研究所で、研究用原子炉 JRR-3 と大強度陽子加速器施設 J-PARC で 4 台の中性子散乱装置を運営しています。複数の装置を独自に利用できる環境は世界的にも稀で、学生も思う存分、利用できます。

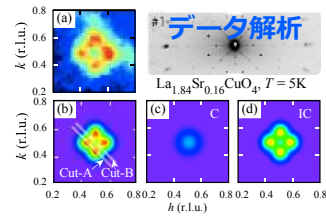
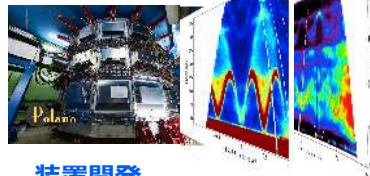
一方、物性解明には、自由度や時間スケールの観測に適した量子ビームの利用が必要です。我々は、研究対象を多角的に捉えるために、中性子を基軸に放射光 X 線やミュオンも活用しています。これら量子ビーム実験は、国内の大型施設はもちろん、海外施設でも行います。

本研究室ではこれまで学内、学外を問わず多くの大学院生を受け入れてきました。学生を主体と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。

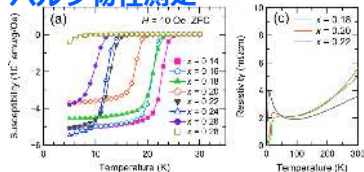
### 物質合成・新奇物質探索



### 量子ビーム実験



### バルク物性測定



### 装置開発



# 強磁場物性グループ

High Magnetic Field Condensed Matter Physics Group

野尻 浩之 教授 木俣 基 准教授 赤木 暢 助教

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

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

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

- 物質制御の有力な手段—強磁場

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

- 研究テーマは主に3つに分かれます

1. 強磁場量子ビーム実験

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

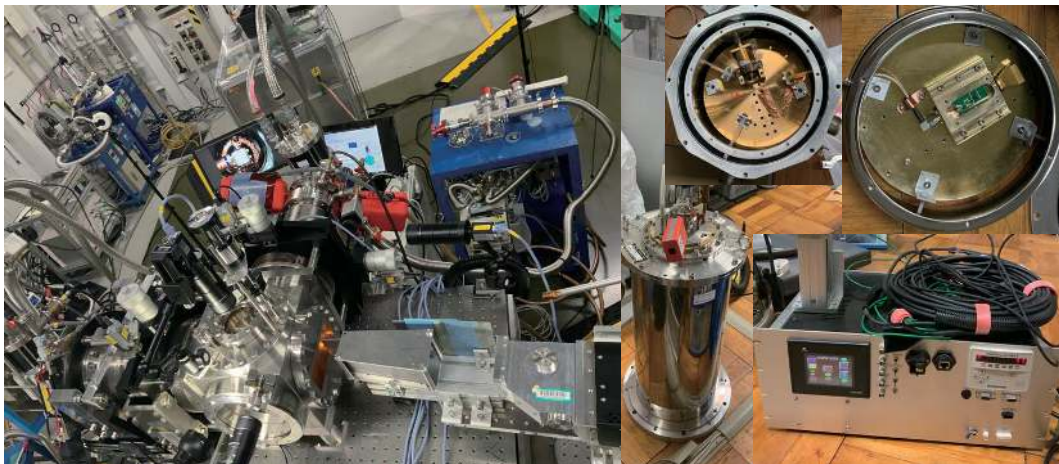
知粒子の探索などの共同研究も推進しています。

2. ナノトポロジーや対称性がもたらす新しい量子磁性、磁気誘電現象

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

3. 量子伝導

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



# 低温物質科学グループ

Low Temperature Materials Science Group

野島 勉 准教授 中村 慎太郎 助教

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

Email: t.nojima@tohoku.ac.jp Tel: 022-215-2167

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

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

## ● 進行中の研究テーマ

### (1) 電場を用いた超伝導制御と新超伝導探索

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

（磁性・誘電性）の共存状態に注目しています。

### (2) 薄膜を用いた 2 次元超伝導物性

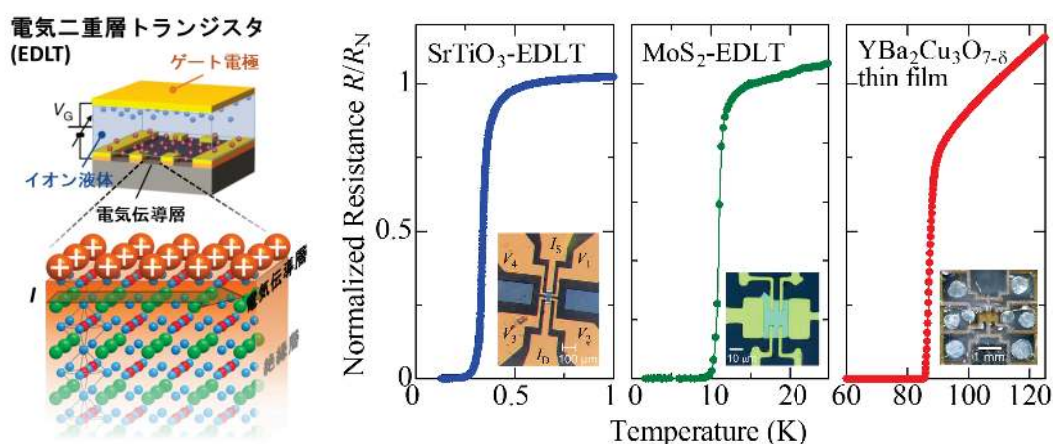
超伝導体を数 nm から数十 nm の薄膜にすると、次元性の低下により新たな特性が現れたり、バルク（3 次元的な固体）で顕著でなかった現象がより鮮明になったりします。様々な種類の超伝導体の薄膜を用いて、超伝導転移温度・転移磁場の上昇や新規超伝導現象の創出を目指した研究を行っています。

### (3) 超伝導体の渦糸物理学

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

## ● 役に立つ実験装置開発

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



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

# 分子物性物理グループ

Condensed Matter Physics in Molecular Materials Group

佐々木 孝彦 教授 井口 敏 准教授 杉浦 栞理 助教 古川 哲也 助教

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

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

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

## ○ 分子性有機物質の精密電子相制御

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

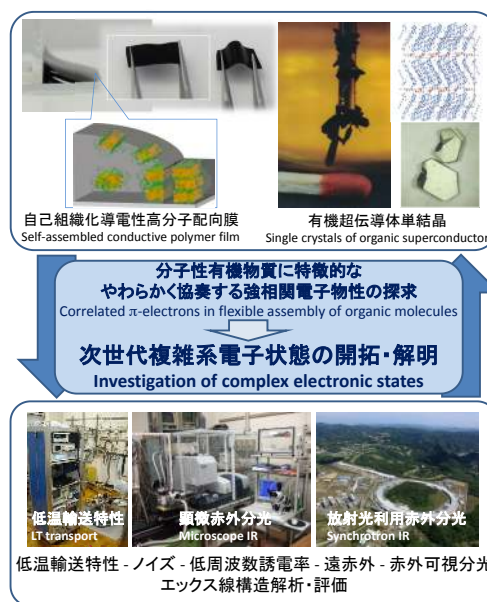
## ○ マルチスケールエネルギーランドスケープ描像が創出する新しいパイ電子物性

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

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

## ○ 導電性有機高分子の構造-電気伝導相関解明に基づく高電気伝導化

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



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

# 強相関電子物理学グループ

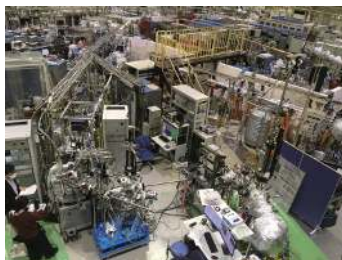
Strongly Correlated Electron Physics Group

解良 聡 教授 (委嘱)<sup>1</sup> 藤森 伸一 教授 (客員)<sup>2</sup> 池本 夕佳 教授 (客員)<sup>3</sup>

Email: <sup>1</sup>kera@ims.ac.jp <sup>2</sup>fujimori@spring8.or.jp <sup>3</sup>ikemoto@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ます。各教員の研究テーマは以下のとおりです。

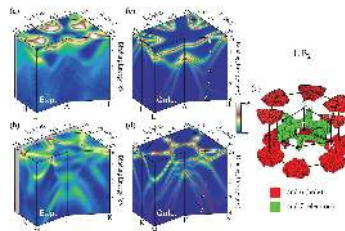
**解良聡**: 有機化合物の中には強相関電子系の特徴を示すものが多くある。分子を量子構造体とする局在電子系のなせる業である。しかし分子間の相互作用は緩く結合した van der Waals 力によって固体を形成するものが多く、その機能・物性を司る本質は、分子に局在化した電子と多彩な階層フォノン (集団的格子振動・局所的分子振動) が担っている。弱い相互作用の影響は狭いエネルギー領域で複数現象が競合する形で現れるため、計測実験自身の困難さに加え、本質的に外的環境因子で容易に変化する「観測しにくい」状態である。有機化合物を材料として応用展開しようとする、しばしば固体物理学で培われてきた学理が適用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。

**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 に設置した光電子分光装置や 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。



角度分解光電子分光によって得られた UB<sub>2</sub> のフェルミ面・バンド構造とバンド計算の比較。

**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ます。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します。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す。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す。これを活用して、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ます。以下にビームラインの写真を示します。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ます。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ます。また、赤外近接場分光装置開発も行っています。



SPring-8 BL43IR。



# 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    栗栖 実 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様々な特徴を持っています。生命が物質からどのようにして生まれたのかを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) 生命システムの構築

生命は、膜で取り囲まれた領域（個体）を確保し、その中で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生命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、この生命システムの根幹は、DNAなどの情報分子を介してシステムの環境への適応度を変化させていく進化にあります。この進化の熱力学的な駆動力についても研究を進めることにより、進化する生命システムとは何かについて考えています。

## 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（平衡状態）では全く異なる性質を示します。それぞれの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。

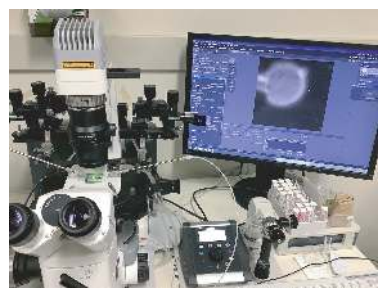
生体膜は、生命システムと外界の境界であるとともに、代謝などの生命機能を発現させる場として重要な役割を果たしています。その生体膜での機能発現は膜でのタンパク質の拡散を通して制御されるため、膜の流動性は重要な因子となります。我々は膜の流動性を簡単に調べる方法を開発し、生きた状態と死んだ

状態で流動性がどのように変化するかを調べています。脂質分子から成る単純なモデル生体膜において膜の不均一性や非対称性などの膜の組成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流動性を支配する要因の解明を試みています。さらに、生きた細胞膜は常に細胞質などから力を受けた非平衡状態にあり、死んだ状態での流動性とは大きく異なることが予想されます。この“生きている状態”と“死んだ状態”での生体膜の流動性測定を行い、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は生存競争に打ち勝つために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再現するシミュレーションを行い、細胞が進化の過程で身につけた形態形成を支配する力学モデルの解明を進めています。

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。

# 超高速分光グループ

Ultrafast Spectroscopy Group

岩井 伸一郎 教授 川上 洋平 准教授 天野 辰也 助教

<http://femto.phys.tohoku.ac.jp/> Email: [s-iwai@tohoku.ac.jp](mailto: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。

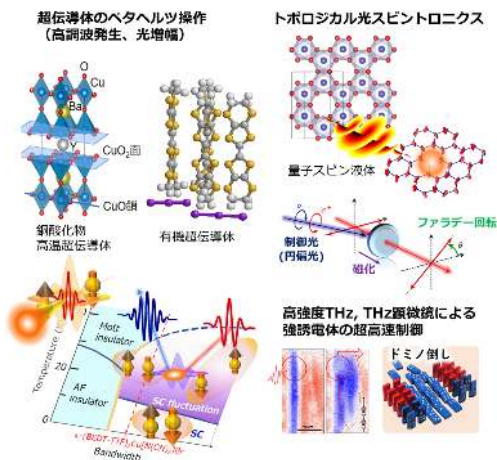


図1. 量子多体物質における光強電場効果とアト秒光機能の開拓。

(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 フェムト秒）を開発し、「光電場が電子を駆動する」世界を究極のアト秒時間精度でのぞきます。強相関電子系のフロケ（光と電子の強結合）状態や高次高調波発生を探索します。

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

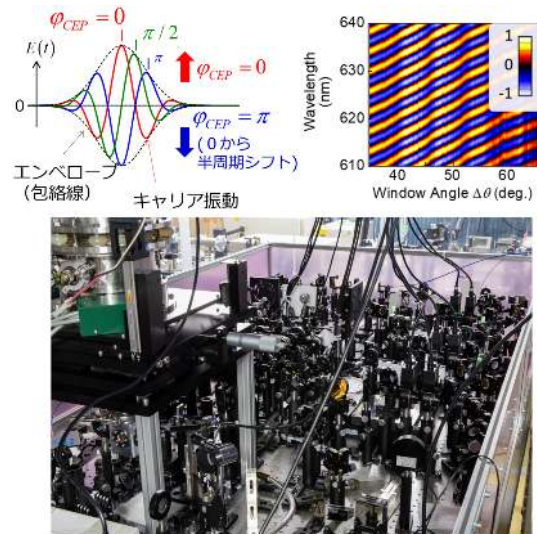


図2. 光電場のキャリアエンベロープ位相制御極（上）と短パルス光源を用いた超高時間分解測定装置（下）。

# 量子ダイナミクスグループ

Quantum Dynamics Group

遊佐 剛 教授

橋本 克之 助教

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

現代社会の毎日の生活を支えている半導体産業は、超高品質な結晶作成技術やデバイス技術など多くのハイテク技術で成り立っています。私たちはこのよう先端技術に裏打ちされた超高純度半導体デバイスや新奇材料を舞台とし、電子やホール、励起子、核スピン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。

このような理想的な舞台を用いた研究は、物性物理だけでなく基礎物理の面でも意義があります。ビックバンのような宇宙創成の初期段階で現れるプランクスケールの宇宙である「量子宇宙」やブラックホールの検証を行うためのトイモデルを、半導体チップ上で実現する研究に最近特に力を入れており、素粒子、宇宙論、量子情報、物性理論や材料系といった幅広い研究者の方々と共同研究を通じて新しい物理を探求していこうと考えています。

## ★ 実験研究で探る量子宇宙/量子情報

トポロジカル物質の代表例である量子ホール状態は、絶縁体であるバルクが伝導体であるエッジに守られた構造をもっています。このエッジは時間1+空間1=2次元の共形場理論で記述できるため、量子力学と重力の両方が重要となる量子宇宙やブラックホールを擬した実験系として最適な系で、現在研究室のメインの研究テーマとなっています。また、最近、量子情

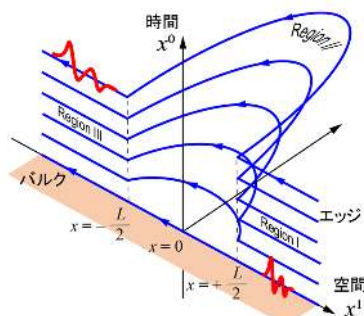


図1. 量子ホールエッジの2次元時空図。エッジは平坦な時空から曲がった時空を伝搬し、引き延ばされた後、平坦な時空に出力される。

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

## ★ 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、量子宇宙の舞台にもなる系ですが、物性研究からも興味深い系です。

## ★ その他

国内外の研究グループと共同で新奇材料に関する研究も行っています。病院等で利用されている磁気イメージング法 (MRI) は、核磁気共鳴 (NMR) の原理により、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が、私たちの研究室では、通常の NMR や MRI とは異なる手法で核スピンや電子スピン共鳴に関する研究も行っています。

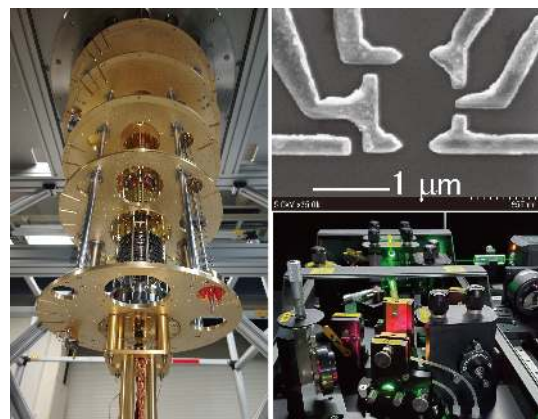


図2. (左) 最低温度5ミリケルビンを実現し、強磁場を発生することのできる装置の内部。(右上) 半導体デバイスの一例。(右下) 光学測定系の一例。

# 量子光学グループ

Quantum Optics Group

金田 文寛 教授      吉澤 雅幸 教授\*      富田 知志 准教授（高教機構）

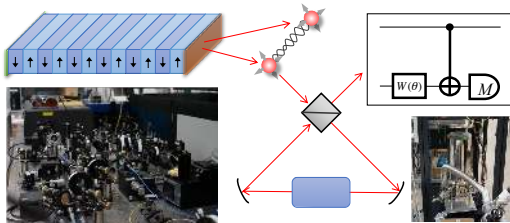
松原 正和 准教授      大野 誠吾 助教

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

本研究グループでは、光の量子性や物質との相互作用を高度に開拓し、新たな光学的、物性的機能を創出することを目的としています。量子もつれをはじめとする光自身が示す量子的現象や、メタマテリアル、有機共役 $\pi$ 電子系、電気磁気光学物質、およびこれらをハイブリッドする新規物質を主な研究対象とし、紫外・可視・近赤外・テラヘルツ・マイクロ波などの幅広い周波数帯の光（電磁波）における独自の光学技術を駆使して研究を推進しています。

## 1) 量子光学と量子技術

光の量子である光子は、黒体放射や光電効果などを通じて、人類が量子の世界を認識、理解するための重要な概念でありました。そして現在では、光子は基礎物理でのみならず、従来の計算機では困難な計算問題の高速計算、安全な情報通信、分解能を極限まで高める光計測などに利用できる可能性が示唆されており、大きく注目されています。本グループでは、光子やそれを取り巻く量子現象を探究し、高度な量子技術を実現することを目指して研究しています。特に現在は、人工構造物質における単一光子レベルでの非線形光学や新たな多光子干渉の実証、古典論的直観に反する「量子もつれ」や「量子揺らぎ」現象の発生と抑制、任意量子光状態の発生、光量子ゲート開発、そして量子情報処理や量子計測の実証などに挑戦しています。



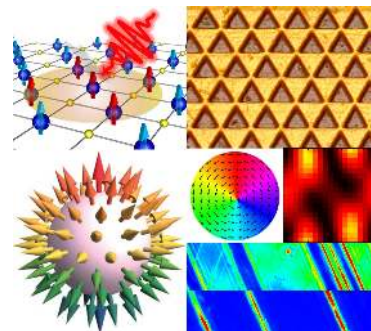
## 2) 有機共役 $\pi$ 電子系の非線形分光

共役 $\pi$ 電子をもつ有機物質系には1次元や2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。それらの特性を調べるためにレーザーおよび非線形分光法の開発を行い、多色マルチ光励起による光機能性の解明を進めています。

3) 光スピントロニクス

## 3) 光スピントロニクス

対称性や光応答を人工操作した磁性メタマテリアル、磁性体と誘電体の特徴を兼ね備えるマルチフェロイック物質、磁気モノポールなどを実現するメゾスコピック人工磁性体などを舞台に、電子のスピンの（磁石の性質）を組み込んだ量子物性機能の探索や新しい物理原理・光物質機能の開拓を目指しています。特に、光により電子スピン配列／スピン流を制御する新規光スピントロニクス原理の開発、高度な光イメージング技術を用いた量子物性機能の解明、磁性・誘電性・光応答が結合する電気磁気光機能（光のダイオード機能・波長変換機能・光電変換機能）の創出など、光-電気-磁気を融合する最先端の光物質科学を開拓します。



## 4) メタマテリアルフォトニクス

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

# スピン機能物質科学グループ

Spin-Related Functional Materials Science Group

小野瀬 佳文 教授      新居 陽一 准教授      増田 英俊 助教      石田 浩祐 助教

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

スピン磁気モーメントが整列している磁性体はいろいろな応用がなされています。特に、スピンの平行に整列している強磁性体は工業用磁石や磁気メモリなどで広く活用されています。近年の研究によって明らかになったことは、スピン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。

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

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

## ● 進行中の研究テーマ

### (1) 空間反転対称性が破れた磁性体におけるマグノンの非相反性

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

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

### (2) マルチフェロイクスにおける表面弾性波

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

### (3) マグノン、フォノンの熱ホール効果

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

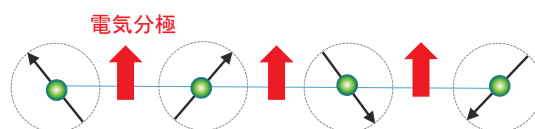


図1. 強誘電性を示す、らせん磁気構造。

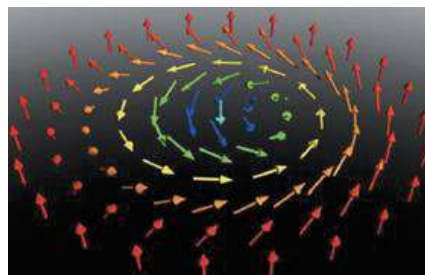


図2. トポロジカル磁気構造体スキルミオン。

# 結晶成長物理グループ

Crystal Growth Physics Group

藤原 航三 教授    森戸 春彦 准教授    前田 健作 助教    荘 履中 助教

<http://www.xtalphys.imr.tohoku.ac.jp/>    E-mail: [kozy@imr.tohoku.ac.jp](mailto: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。

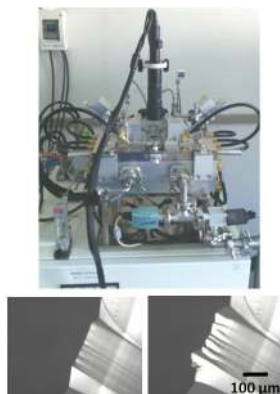
本グループでは、独自に“その場”観察装置を開発し、Si の融液成長メカニズムの解明と制御に関する研究を展開しています。本技術は、半導体材料だけでなく、各種化合物材料や金属材料など高融点材料の固液界面の観察にも適用できるため、融液成長の総理解を目指して研究を発展させていきます。

## 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

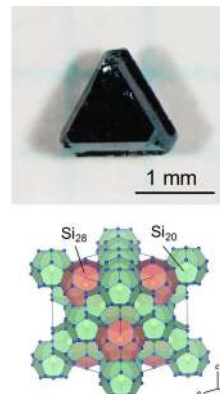
金属フラックスを用いた独自の結晶成長プロセスにより、新機能や高性能を示す新しい結晶材料の創製を目指しています。



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 山本 孟 助教 (兼任)

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

## 独自表面構造解析法の開発

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

## NanoTerasu等を使用した表面電子状態研究

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

## 極端環境での物質探索と電子状態の理解

表面研究でも用いられる分光学的な手法を活用することで、超高压などの極端環境で得られる新奇物質結晶の電子状態に関する研究も進めています。電子状態を解明することで、

これらの物質が示す磁性や電子物性の起源を明らかにします。例えば最近では、遷移金属化合物において価電子間の強い相関によって形成される一種のクラスター状態を、放射光 X 線を用いて詳しく解明しようとしています。特別な測定手法と合成手法を組み合わせることで、未知の物理現象の発見を目指します。

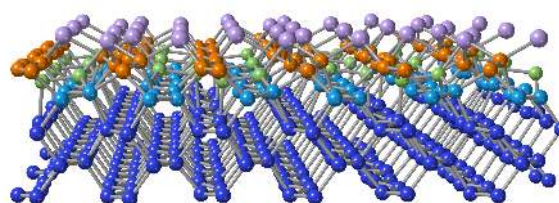
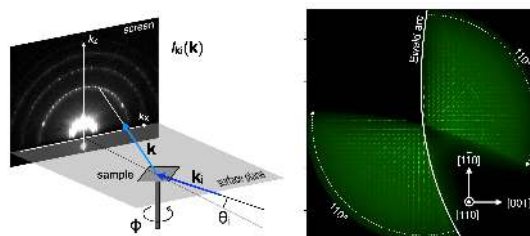


図 1. W-RHEED により決定した Si(110)3x2-Bi 表面構造。

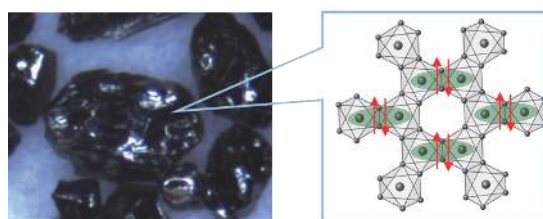


図 2. 超高压条件下で得られたバナジウム化合物の単結晶と、その結晶中に現れる新奇な電子状態。

# スピン量子物性グループ

Quantum Spin Physics Group

佐藤 卓 教授    那波 和宏 准教授    金城 克樹 助教    Wu Hung-Cheng 助教

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

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

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

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

本研究室では、スピン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ジカルスピントクスチャーの形成とそのスロダイナミクスの研究
- ・ 非周期スピン系における磁気秩序とダイナミクスの研究
- ・ 中性子非弾性散乱分光器の開発
- ・ 中性子非弾性散乱スペクトル解析法の開発

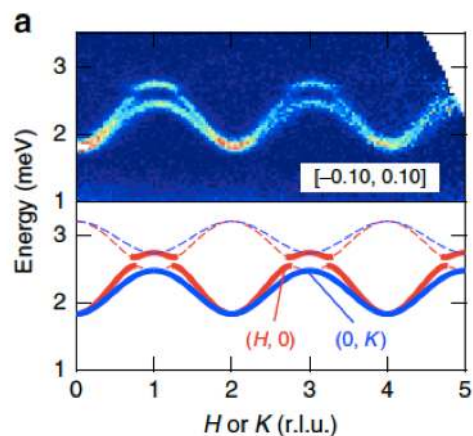
本研究室の特色としては、一人一人の学生が試料作成から中性子データ解析までを一貫して行うことにあります。このため、研究対象とする物理現象への深い理解が得られると期

待されます。

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

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

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



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



# 電子線ナノ物理グループ

Electron-Crystallography and -Spectroscopy Group

寺内 正己 教授\* 佐藤 庸平 准教授 松本 高利 助教

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

Email: 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、

- ・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、

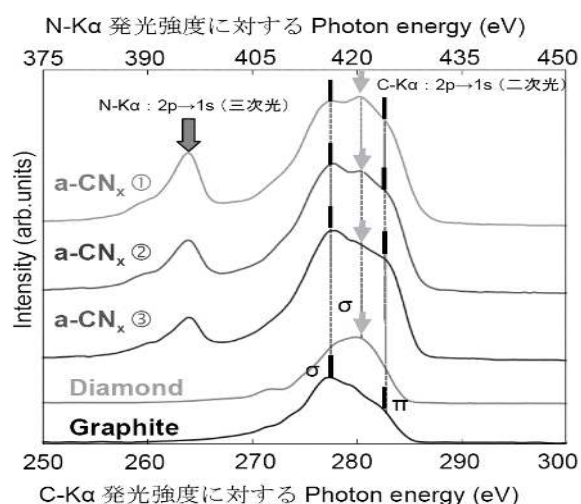
を行っています。これらの測定手法の精度向上のための装置・解析手法の開発と、その物性物理学への応用を行い、多くの成果を上げてきました。

現在、次のようなテーマについて研究を行っています。

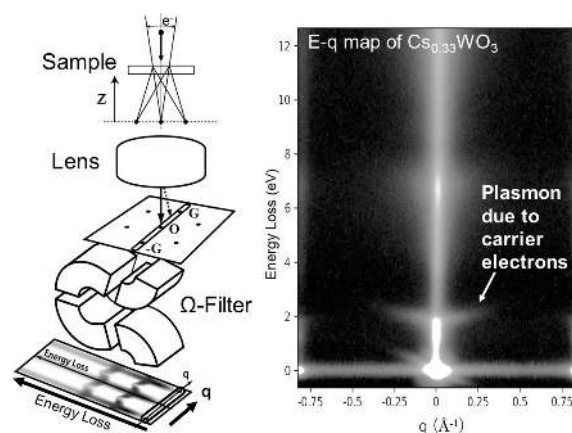
1. クラスタ物質やナノネットワーク物質 (ナノチューブ, フラレン, ボロン化合物など) の構造・電子状態
2. 近赤外光散乱ナノ微粒子の光学物性
3. 角度分解 EELS によるプラズモン振動の運動量依存性

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

5. 軟 X 線発光分光の自己吸収効果を用いた価電子帯・伝導帯の同時解析



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

佐藤 卓 教授 (兼任)      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 Å 以下の変化であっても結晶の性質（誘電性、伝導性、磁性など）が大きく変わることがしばしば起こります。このような原子や電子の変位を X 線や中性子線などを用いた回折実験で「観る」ことにより、結晶の世界の法則を明らかにしていきます。

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

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

・ 研究室の主要研究テーマ

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

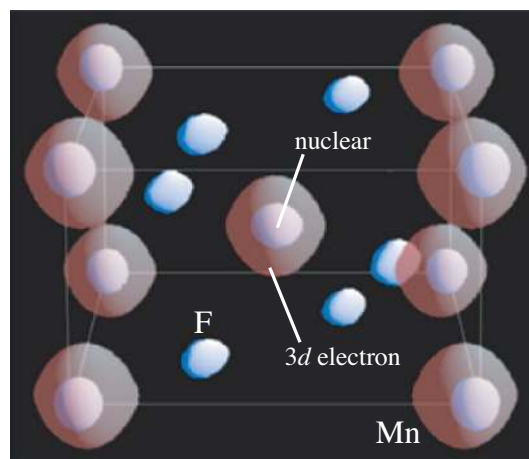


図 1. 単結晶を用いた精密結晶・磁気構造解析により得られた反強磁性体  $\text{MnF}_2$  の原子核密度分布 (青丸) と  $\text{Mn}^{2+}$  スピン密度分布 (赤丸)。赤丸は、3d 軌道を占有している電子スピンの空間分布を表している。

# 量子機能計測グループ

Quantum Measurement and Functional Sensing Group

大谷 知行 教授 (客員)

<https://thzimg.riken.jp>

Email: [chiko.otani.c4@tohoku.ac.jp](mailto:chiko.otani.c4@tohoku.ac.jp), [otani@riken.jp](mailto:otani@riken.jp)

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

本研究のテーマは、赤外線と電波の中間に位置するミリ波・テラヘルツ電磁波（周波数 0.1–30 THz）領域における量子計測とセンシング・イメージングに関する研究です。テラヘルツ帯は、電磁波の光と波の両方の性質が融合して現れる帯域で、ソフトマテリアルに対する物質透過性や特徴的な吸収スペクトル構造を示すとともに、近未来の超高速無線通信（Beyond 5G/6G）のキャリアとしても期待されています。

本テーマでは、ミリ波・テラヘルツ波の高感度検出のための超伝導マイクロ波力学インダクタンス検出器（MKIDs）の研究開発（図 1）、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の偏光観測のための GroundBIRD 実験（図 2）、テラヘルツ波を用いたセンシング・イメージング、及び、テラヘルツ波照射による生細胞内のたんぱく質の構造・機能のアクティブ制御に関する研究を行っています。この研究は、理化学研究所仙台支所（仙台市青葉区）にて進められます。

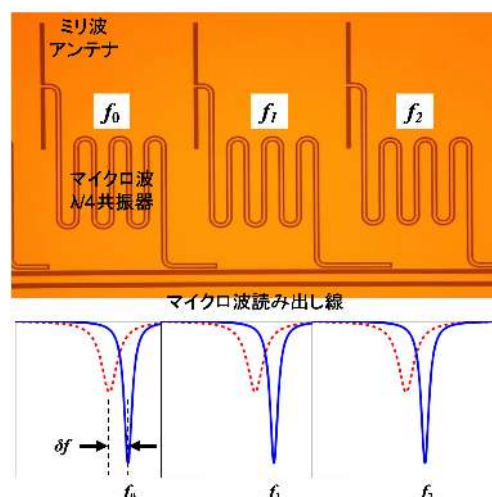


図 1. ミリ波検出用のマイクロ波力学インダクタンス検出器の構造と共振ピークの模式図。

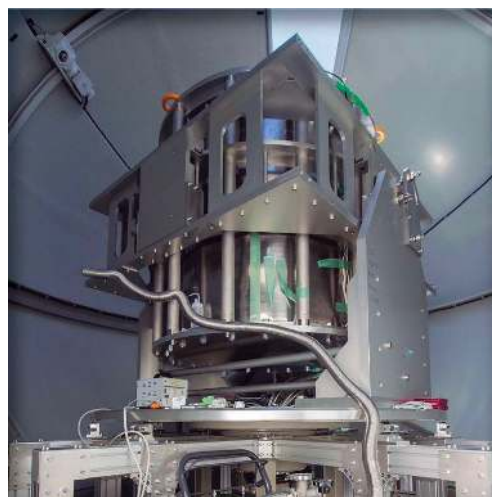
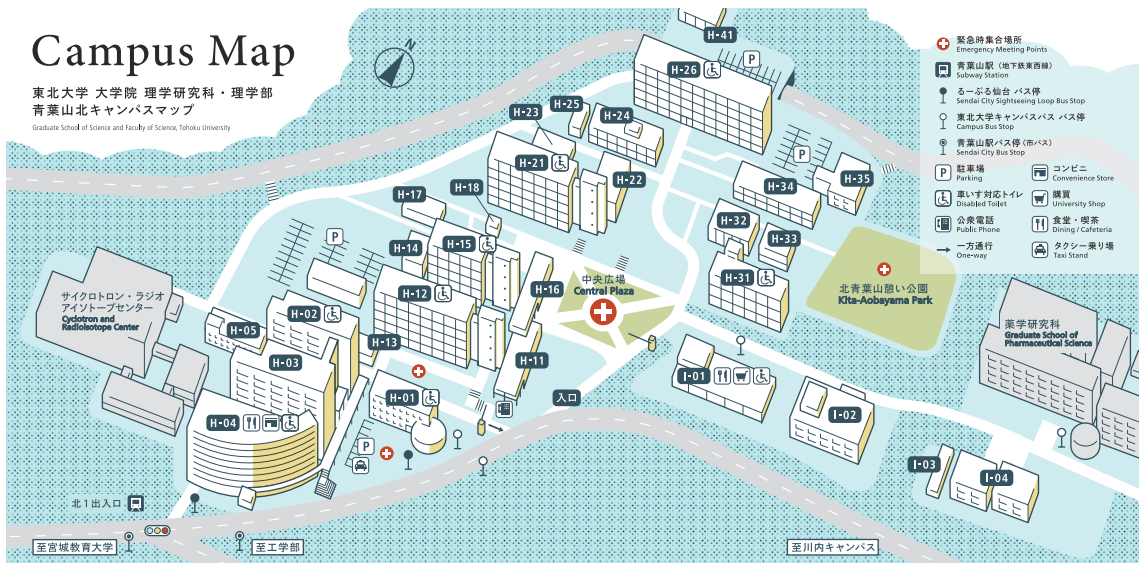


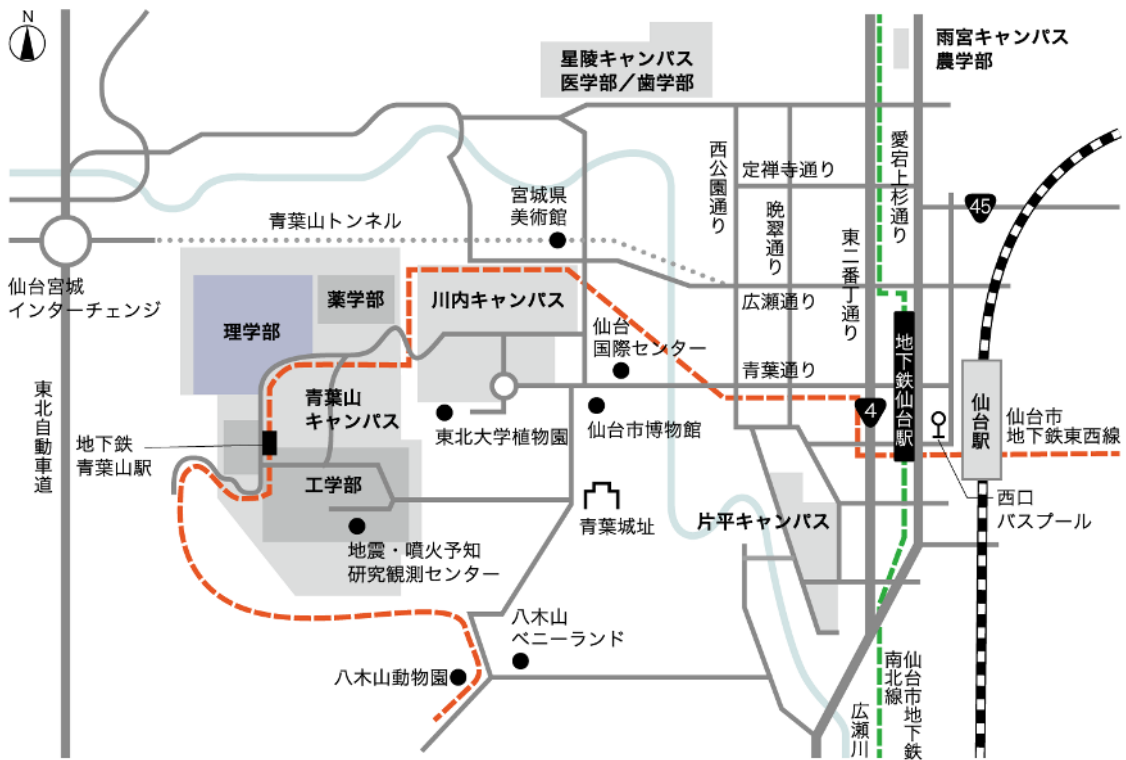
図 2. スペイン・カナリア諸島に設置した宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測実験のための GroundBIRD 望遠鏡。

# Campus Map

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



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

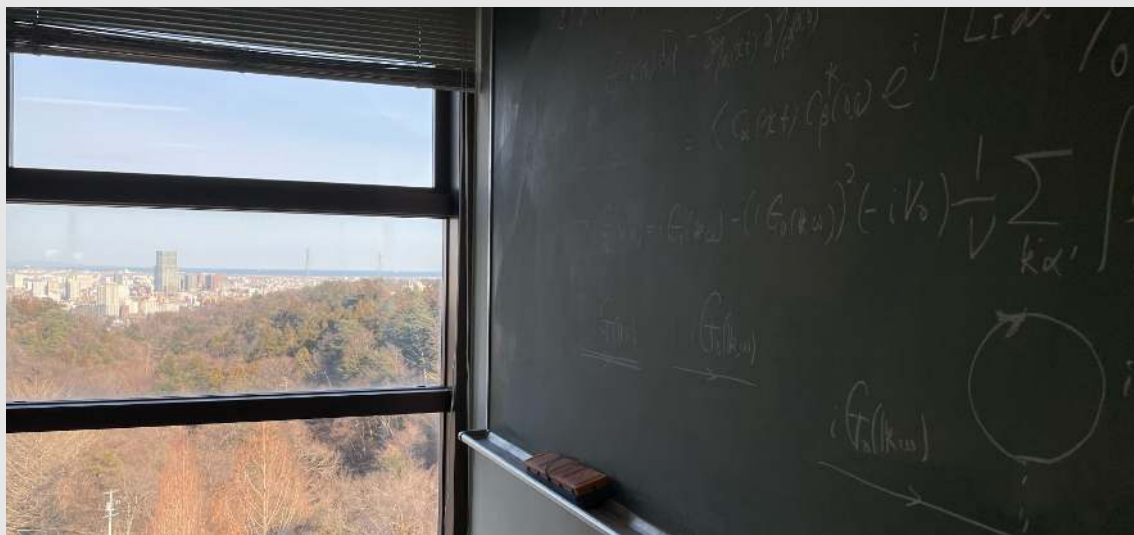


交通: JR 仙台駅西口 地下鉄東西線仙台駅より地下鉄東西線

「八木山動物公園行き」にて9分、「青葉山駅」下車 徒歩5分

表紙説明：青葉山北キャンパスの理学研究科合同棟にある物性理論グループ学生居室での大学院生との議論風景。この居室から仙台市街が一望できます。

表紙デザイン：那須讓治



---

### 東北大学大学院理学研究科物理学専攻 案内

---

発行	2024年4月
編集	物理学専攻 パンフレット・広報委員会
問い合わせ先	〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3 東北大学大学院 理学研究科 教務課 教務企画係
電話	022-795-6494
ファックス	022-795-6345
電子メール	kyomu@jimu.phys.tohoku.ac.jp
Web ページ	<a href="http://www.phys.tohoku.ac.jp/">http://www.phys.tohoku.ac.jp/</a>

---