

東北大学大学院 理学研究科 物理学専攻案内 2016



東北大学

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）として創立される。
- 1912 仙台中心部の片平地区で数学科、化学科とともに開講する。
- 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、物理学専攻が設置される。
- 1957 原子核理学専攻が設置される。
- 1964 物理学第二学科が設置される。
- 1968 物理学第二専攻が設置される。
- 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・統合される。
- 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)が開始される。
- 2015 理学研究科合同C棟が完成する。

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、物理系専攻事務室、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。

表紙説明：

当専攻の光電子固体物性研究室で開発した世界最高水準の分解能を持つスピン分解光電子分光装置。上部のお椀型の機器は、本装置の中心をなす静電半球型電子エネルギー分析器。本装置を用いて、高温超伝導体、グラフェン、トポロジカル絶縁体などの新機能物質のスピン分解電子状態を、高い分解能で直接観測できる。(表紙デザイン：佐藤宇史)

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、大学院生も指導教員と協力して国際的にも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て、その高度な研究を支えています。このような実績に支えられ、東北大学はNatureの特別企画冊子であるNature Index 2016による研究機関ランキングのPhysical Sciences（物理科学）の分野で、国内2位の評価（2015年1月～12月の集計）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、下記のインターネットWebページから、さらに詳しく調べることができます。

仙台の地は、大学の環境だけではなく、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1912年から始まります。初代教授陣には海外留学から帰国した本多光太郎らが迎えられ、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、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、原子核理学専攻と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五基幹講座（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）と二専担講座（領域横断物理学、相関物理学）から構成されました。これらに研究教育上協力する講座が、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、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 月末に行われます。自己推薦入試に関する詳細はウェブページ: http://www.phys.tohoku.ac.jp/admission/graduate-school_entrance/zenki2nen-jikosuisen/ にて案内しております。一般選抜の出願期間は平成 28 年 7 月 11 日から 7 月 15 日まで、自己推薦入試の出願期間は平成 28 年 6 月 6 日から 6 月 10 日までです。自己推薦入試の志願者は、物理学専攻の研究グループの中から志望研究グループを一つ選択し、担当教員に受入の承諾を得た上で、平成 28 年 5 月 23 日までに必要書類を提出してください。

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。か、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@mail.phys.tohoku.ac.jp、もしくは物理専攻の大学院入試に関する問合せ用 E-mail: inshi@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。

就職先は、物理学の基礎的知識と思考力を身につけていることが評価され、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、教員など多方面におよんでいます。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、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）の修了生は国内外の多くの大学、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) 平成 30 年 3 月末までに定年となる教員 (* 印) は、平成 29 年度入学者の指導教員にはなれない。また平成 29 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。

面接グループ	大講 座・協 力 講 座	研 究 グ ル ー プ	教 員	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	素粒子・宇宙理論 Particle Theory and Cosmology Group	ひかさ けんいち 日笠 健一 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 すみの ゆきなり 隅野 行成 准教授 たかはし ふみのぶ 高橋 史宜 准教授 わたむら さとし 綿村 哲 准教授 ほった まさひろ 堀田 昌寛 助 教 やまだ よういち 山田 洋一 助 教 よこざき のりみ 横崎 統三 助 教	12
		原 子 核 理 論 Nuclear Theory Group	さ さ き しょういち 佐々木 勝一 准教授 はぎの こういち 萩野 浩一 准教授 お の あきら 小野 章 助 教 まるやま まさひろ 丸山 政弘 助 教	14

面接グループ	大 講 座・協 力 講 座	研 究 グ ル ー プ	教 員	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 こしの みきと 越野 幹人 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 うちだ なりや 内田 就也 助 教 おおつき じゅんや 大槻 純也 助 教 なか まこと 中 惇 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 助 教 トレスナヌグラハ Tresna Nugraha 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	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) (学際科学フロンティア研究所 ¹) (Frontier Research Institute for Interdisciplinary Science ¹)	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 たかはし さぶろう 高橋 三郎 助 教 オレグ トレティアコフ Oleg Tretiakov 助 教 ジョセフ バーカー Joseph Barker 助 教 あらき やすふみ 荒木 康史 助 教 ¹	17

面接グループ	大講 座・協 力 講 座	研 究 グ ル ー プ	教 員	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 (Accelerators) Group	やまもと ひとし 教 授 山本 均 さぬき ともゆき 准教授 佐貫 智行 ながみね ただし 助 教 長嶺 忠 いしかわ あきまさ 助 教 石川 明正	18
	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) (高度教養教育・ 学生支援機構 ¹) (Institute for Excellence in Higher Education ¹)	素 粒 子 実 験 (ニュートリノ) Experimental Particle Physics (Neutrino) Group	いのうえ くにお 教 授 井上 邦雄 しらい じゅんぺい 教 授 * 白井 淳平 すえかね ふみひこ 准教授 末包 文彦 こが まさゆき 准教授 古賀 真之 みつい ただお 准教授 三井 唯夫 しみず いたる 准教授 清水 格 なかむら けんご 講 師 中村 健悟 たまえ きょうこ 助 教 玉江 京子 がんだう よしひと 助 教 丸藤 祐仁 いけだ はるお 助 教 池田 晴雄 うえしま こうた 助 教 上島 孝太 いしどしろ こうじ 助 教 石徹白 晃治 わたなべ ひろこ 助 教 渡辺 寛子	20
		原 子 核 物 理 Experimental Nuclear Physics Group	こばやし としお 教 授 * 小林 俊雄 たむら ひろかず 教 授 田村 裕和 なかむら さとし 教 授 中村 哲 いわさ なおひと 准教授 岩佐 直仁 せきぐち きみこ 准教授 関口 仁子 こいけ たけし 准教授 小池 武志 かねた まさし 助 教 金田 雅司 み わ こうじ 助 教 三輪 浩司 み き けんじろう 助 教 三木 謙二郎 ながお しょう 助 教 ¹ 永尾 翔	22
		中間エネルギー核物理 * Intermediate Energy Nuclear Physics Group	まえだ かずしげ 教 授 * 前田 和茂 かんだ ひろき 助 教 神田 浩樹	24

面接グループ	大 講 座・協 力 講 座	研 究 グ ル ー プ	教 員	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	しみず はじめ 教授* 清水 肇 はま ひろゆき 教授 濱 広幸 すだ としみ 教授 須田 利美 ひので ふじお 准教授 日出 富士雄 かしわぎ しげる 准教授 柏木 茂 むらまつ のりひと 准教授 村松 憲仁 きくなが ひでとし 准教授 菊永 英寿 いしかわ たかつぐ 助教 石川 貴嗣 みやべ まなぶ 助教 宮部 学 むとう としや 助教 武藤 俊哉 つかだ きょう 助教 塚田 暁 ときやす あつし 助教 時安 敦史	25
	核放射線物理学講座 Nuclear Radiation Physics (協力講座：サイクロトロン・ ラジオアイソトープセンター) (Cyclotron and Radioisotope Center) (学際科学フロンティア研究所 ¹) (Frontier Research Institute for Interdisciplinary Science ¹)	核 放 射 線 物 理 Nuclear Radiation Physics Group	さけみ やすひろ 教授 酒見 泰寛 いとう まさとし 准教授 伊藤 正俊 はらだ けんいち 講 師 原田 健一 かわむら ひろかず 助教 ¹ 川村 広和 いのうえ たけし 助教 ¹ 井上 壮志 まつだ ようへい 助教 松田 洋平 たなか かづお 助教 田中 香津生	27
	加速器科学講座 Accelerator Science (連携大学院： 日本原子力開発機構 ¹) (Japan Atomic Energy Agency ¹) (連携大学院： 高エネルギー加速器研究機構 ²) (High Energy Accelerator Research Organization ²)	加 速 器 科 学 Accelerator Science Group	きんしょう みちかず 教授 ¹ 金正 倫計 (客員) たなか かずひろ 教授 ² 田中 万博 (委嘱) はば じゅんじ 教授 ² 幅 淳二 (委嘱)	28

面接グループ	大 講 座・協 力 講 座	研 究 グ ル ー プ	教 員	掲載頁
物性実験 I Condensed Matter Experiment I	電子物理学講座 Condensed Matter Physics –Electronic Properties– 相関物理学講座 Strongly Interacting Many Particle Quantum Systems (原子分子材料科学 高等研究機構 ¹) (WPI Research Center : Advanced Institute for Materials Research ¹)	光電子固体物性 Photoemission Solid–State Physics Group	たかはし たかし 教 授 * 高橋 隆 さとう たかふみ 准教授 佐藤 宇史 そうま せいご 准教授 ¹ 相馬 清吾 なかやま こうすけ 助 教 中山 耕輔 すがわら かつあき 助 教 ¹ 菅原 克明	29
		ナノ固体物理 Nano Solid–State Physics Group	たにがき かつみ 教 授 谷垣 勝己 しもたに ひでかず 准教授 下谷 秀和 たなべ よういち 助 教 田邊 洋一 まつした 助 教 松下 ステファン ^{ゆう} 悠 へぐり さとし 助 教 ¹ 平郡 諭	30
		極低温量子物理 Low Temperature Quantum Physics Group	おちあい あきら 教 授 落合 明 きむら のりあき 准教授 木村 憲彰 かべや のりゆき 助 教 壁谷 典幸	31
		巨視的量子物性 Macroscopic Quantum Phenomena Group	おおぐし けんや 教 授 大串 研也 いまい よしのり 講 師 今井 良宗 あおやま たくや 助 教 青山 拓也 とみやす けいすけ 助 教 富安 啓輔	32
		ミクロ物性物理 Microscopic Research on Magnetism Group	たかぎ しげる 准教授 高木 滋	33
		低次元量子物理 Low–Dimensional Quantum Physics Group	まつ井 ひろし 准教授 松井 広志	34

面接グループ	大 講 座・協 力 講 座	研 究 グ ル ー プ	教 員	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 教 授 なんぶ ゆうすけ 南部 雄亮 准教授 すずき けんすけ 鈴木 謙介 助 教 いけだ よういち 池田 陽一 助 教	35
		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 教 授 も ぎ いわお 茂木 巖 助 教 きはら たくみ 木原 工 助 教 ひらた みちひろ 平田 倫啓 助 教	36
		低 温 物 質 科 学 Low Temperature Materials Science Group	のじま つとむ 野島 勉 准教授 なかむら しんたろう 中村 慎太郎 助 教	37
		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 教 授 いぐち さとし 井口 敏 准教授 はしもと けんいちろう 橋本 顕一郎 助 教 いとう けいすけ 伊藤 桂介 助 教	38
		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 教 授 ふじわら こうへい 藤原 宏平 講 師 しおがい じゅんいち 塩貝 純一 助 教 はらだ たかゆき 原田 尚之 助 教	39
	強相関電子物理学講座 Strongly Correlated Electron Physics (連携大学院: 分子科学研究所 ¹) (Institute for Molecular Science ¹) (連携大学院: 物質・材料研究機構 ²) (National Institute for Materials Science ²) (連携大学院: 高エネルギー加速器研究機構 ³) (High Energy Accelerator Research Organization ³)	強 相 関 電 子 物 理 Strongly Correlated Electron Physics Group	やまもと ひろし 山本 浩史 教 授 ¹ (委 嘱) てらしま たいち 寺嶋 太一 教 授 ² (委 嘱) くみがしら ひろし 組 頭 広志 教 授 ³ (委 嘱)	40

面接グループ	大 講 座・協 力 講 座	研 究 グ ル ー プ	教 員	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 (高度教養教育・学生支援機構 ¹) (Institute for Excellence in Higher Education ¹)	表 面 物 理 Surface Physics Group	すとう 須藤 彰三 教 授 えぐち 江口 とよあき 准教授	41
		ソフトマター・生物物理 Soft Matter and Biophysics Group	いまい まさゆき 教 授 今井 正幸 みやた ひでたけ 准教授 宮田 英威 おおば てつひこ 助 教 大場 哲彦 さくま ゆか 助 教 佐久間 由香	42
		光 物 性 物 理 Solid State Photophysics Group	いしはら てるや 教 授 石原 照也 よしざわ まさゆき 教 授 吉澤 雅幸 まつばら まさかず 准教授 松原 正和 おおの せいご 助 教 大野 誠吾	43
		量 子 伝 導 物 性 Solid-State Quantum Transport Group	ひらやま よしろう 教 授 平山 祥郎 ゆき ぎょう 准教授 遊佐 剛 はしもと かつし 助 教 橋本 克之 モハムマッド Mohammad Hamzah Fauzi 助 教 とみまつ とおる 助 教 富松 透	44
		超 高 速 分 光 Ultrafast Spectroscopy Group	いらい しんいちろう 教 授 岩井 伸一郎 いとう ひろたけ 助 教 ¹ 伊藤 弘毅 かわかみ ようへい 助 教 川上 洋平	45
	結晶物理学講座 Crystal Physics (協力講座： 金属材料研究所) (Institute for Materials Research) (原子分子材料科学 高等研究機構 ¹) (WPI Research Center : Advanced Institute for Materials Research ¹)	格子欠陥・ナノ構造物性* Lattice Defect Physics Group	よねなが いちろう 教 授* 米永 一郎 おおの ゆたか 准教授 大野 裕 くつかけ けんたろう 助 教 沓掛 健太郎 でうら ももこ 助 教 出浦 桃子	46
		量 子 ナ ノ 物 性 Quantum Nano Science Group	さいとう えいじ 教 授 ¹ 齊藤 英治 うちだ けんいち 准教授 内田 健一 しおみ ゆうき 助 教 塩見 雄毅 いぐち りょう 助 教 井口 亮 きゅう しゅう 助 教 ¹ 邱 志勇 にいげき ともひこ 助 教 ¹ 新関 智彦	47
		結 晶 成 長 物 理 Crystal Growth Physics Group	ふじわら こうぞう 教 授 藤原 航三 まえだ けんさく 助 教 前田 健作	48

面接グループ	大講 座・協 力 講 座	研 究 グ ル ー プ	教 員	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)	固 体 イ オ ン 物 理 Solid State Ion Physics Group	かわむら じゅんいち 河村 純 一 教 授 くわた なおあき 桑田 直明 准教授 たかはし じゅんいち 高橋 純 一 助 教	49
		ス ピ ン 量 子 物 性 Quantum Spin Physics Group	さとう たく 佐藤 卓 教 授 おくやま だいすけ 奥山 大輔 助 教 な わ かずひろ 那波 和宏 助 教 ヨ ハ ネ ス ラ イ ム Johannes Reim 助 教	50
		電 子 線 ナ ノ 物 理 Electron-Crystallography and -Spectroscopy Group	てらうち まさみ 寺内 正己 教 授 さとう ようへい 佐藤 庸平 助 教	51
		結 晶 構 造 物 性 Structural Physics and Crystal Physics Group	きむら ひろゆき 木村 宏之 教 授 さかくら てるとし 坂倉 輝俊 助 教	52
	量子計測講座 Quantum Sensing and Measurement (連携大学院:NTT 物性科学基礎研究所 ¹) (NTT Basic Research Laboratories ¹) (連携大学院:理化学研究所 ²) (The Institute of Physical and Chemical Research ²)	量 子 計 測 Quantum Sensing and Measurement Group	やまぐち ひろし 山口 浩司 教 授 ¹ (客 員) さ さ き きとし 佐々木 智 准教授 ¹ (客 員) おおたに ちこう 大谷 知行 准教授 ² (客 員)	53

素粒子・宇宙理論グループ

Particle Theory and Cosmology Group

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 高橋 史宜 准教授 綿村 哲 准教授

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，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

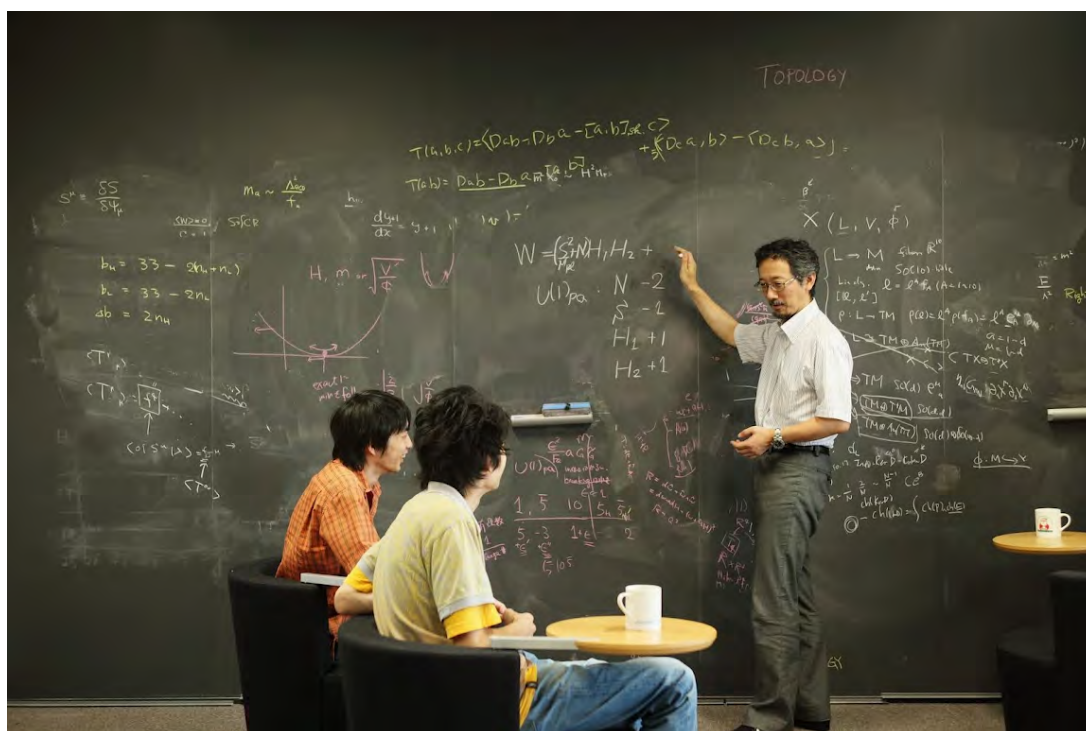
稼働中および計画中の高エネルギー最前線のコライダー実験における素粒子現象の理論的研究や，様々な精密測定における新現象の出現についての理論的研究を行っている。

(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

小野 章 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、小野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、丸山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。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。近年、この高密度状態が膨張して多数のクラスターが生成される現象:原子核における液相気相転移の可能性が指摘されている。本グループでは、反対称化分子動力学という独自の理論を用いて研究を進めている。

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。

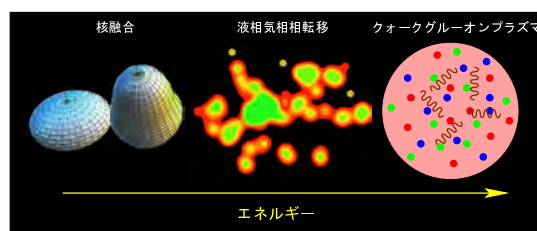


図1 衝突エネルギーによる原子核反応の変化

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

越野 幹人 准教授 柴田 尚和 准教授

泉田 渉 助教 内田 就也 助教 大槻 純也 助教

中 惇 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/>

連絡先 office @ 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などの固体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、物性理論研究の対象が大幅に拡大している。他分野との「境界領域」である、非平衡、量子情報、トポロジー、生体系、素粒子物理や一般相対性理論との融合領域などがその一例である。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ますます重要になっている。

研究室の構成と特徴

本グループでは複数の教授・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

各研究グループの構成と研究課題を以下に記す。

[1] 相互作用の強い電子系の量子物性物理（石原、大槻、中、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、内田、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。また、ソ

フトマターは生物の体をつくる材料でもある。生物は強い非平衡状態にあって化学エネルギーを運動エネルギーに変換するという特性を持っている。代表的な例としてバクテリアや細菌など微生物の運動を、流体力学や同期現象などの理論を用いて研究している。

[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。

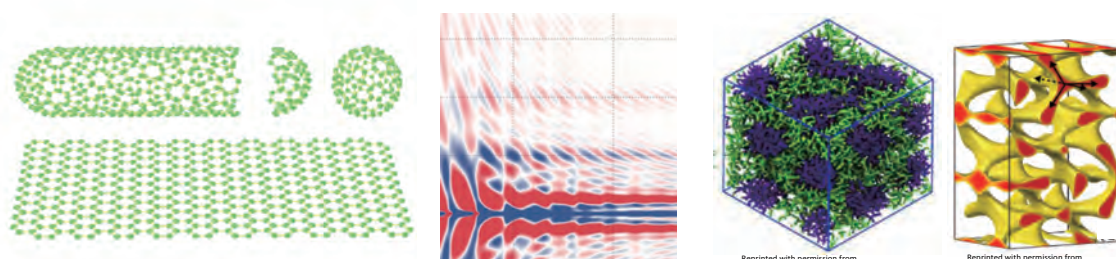
[4] 次元原子層物質・トポロジカル物質（越野）

グラフェンは炭素原子1層だけからなる物質であり、歴史上初めて実現した純粋な2次元結晶である。近年、グラフェンに続いて半導体、磁

性体、超伝導体などさまざまな物質から2次元薄膜が作成されつつあり、「2次元物質」という新しい物理分野が誕生しつつある。2次元にすることで、その母体となる3次元物質とは全く異なる性質を実現できる。たとえば1層のグラフェンは元のグラファイトとは異なり、「質量ゼロの相対論的粒子」と呼ばれる異常な電子が現れる。また1層にすることで、光らない半導体が光る半導体になったり、また超伝導体では転移温度が何倍にも上がることもある。様々な2次元物質における輸送現象、光学特性、磁氣的性質といった現象の理論解析を通じて、今までになかった物性や機能を探究することが可能である。

[5] 低次元強相関電子系の研究（柴田）

半導体に代表される物質の設計加工技術の進歩は工業製品の性能向上に大きな役割を果たしてきたが、そこで制御の対象になったものは半導体の界面に閉じ込められた2次元電子系である。この2次元電子系に磁場を加えると、これまでにない多彩な電子制御が可能になるが、このような系の性質を正しく理解するためには、電子間相互作用により生じる量子多体問題を正確に解くが必要になる。本研究グループでは、このような強相関電子系に対する優れた計算法である密度行列繰り込み群 (DMRG) を利用し、これまで解析が困難であった二次元量子系の基底状態、分数量子ホール効果、超伝導、量子スピン液体、重い電子状態などの様々な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ミ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

高橋 三郎 助教 Oleg Tretiakov 助教 Josheph Barker 助教 荒木康史 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、スピンが熱流と強く結合することが明らかにされ、スピン・カロリトロニクスと呼ばれる新しい分野が生まれた(図1)。我々は、量子ナノ物性グループ(金研)によって発見された、スピン・ゼーベック効果の研究を精力的におこなっている。さらに、ナノスケールのバーネット効果(図2)やアインシュタイン・ドハース効果など、磁気とメカ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。

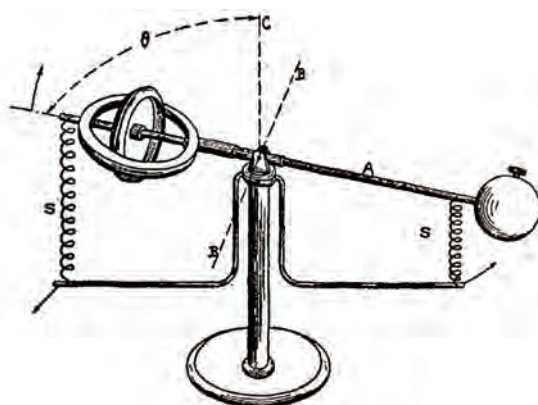


図2 バーネット効果の古典的アナロジー。ジャイロスコープが回転(スピン)するとA軸の傾き θ が変化する。

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 石川 明正 助教

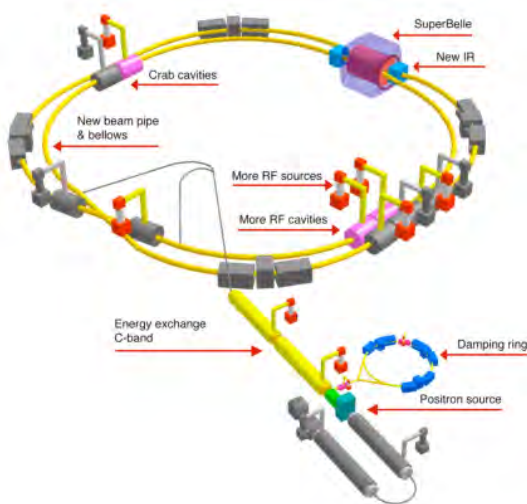
ホームページ <http://epx.phys.tohoku.ac.jp/>

連絡先 022-795-6730 または yhitoshi@epx.phys.tohoku.ac.jp

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が。

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。

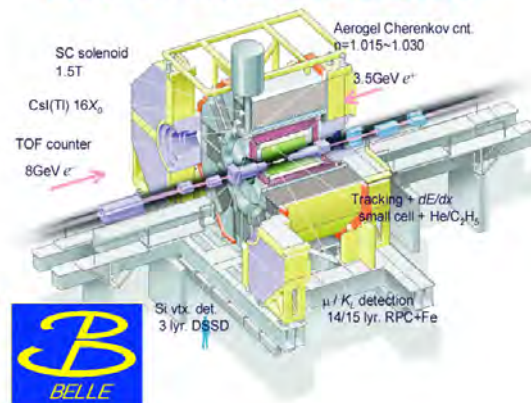


SuperKEKB の概念図

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、がまもなく実現します。

The Belle Detector

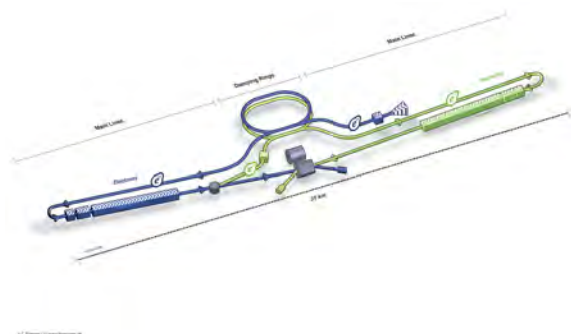


私たちのグループはKEKBの発足当初からBELLE実験において主導的役割を果たしてきました。現在物理解析では、BELLE実験のデータを使い、2つの研究をしています。ひとつは粒子反粒子対称性に関するパラメータのなかでもとくに重要でありかつ難しいといわれる位相角 ϕ_3 の測定です。もうひとつは超対称性粒子などの新物理に敏感な電弱ペンギン崩壊 $b \rightarrow s\gamma$, $b \rightarrow s\ell\ell$ の精密測定です。一方、SuperKEKBではビーム強度が格段に増えるため、現在のままの衝突点付近の設計では背景事象が多すぎて目的の事象をはっきりと測定するこ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

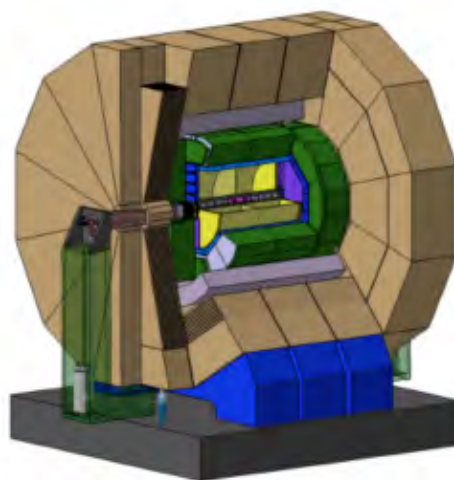
国際リニアコライダー (ILC)

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 30 km の線形加速器でそれぞれ陽子の重さの 250 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。B ファクトリーのように円形の場合は周回している間に何度も衝突の可能性があります、線形だと一回きりなので、ビームを小さく絞ることで反応の確率を高めなければなりません。ビームのサイズをナノメートル単位まで絞りますが、それを正面衝突させるためには高度なビーム測定技術と制御技術が必要とします。



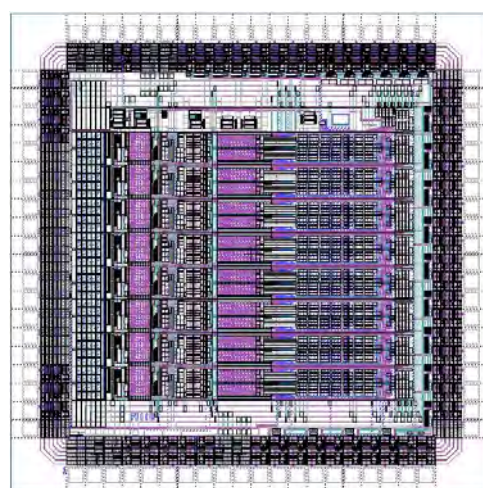
国際リニアコライダーの概念図

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に質量を与える粒子です。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。それゆえに、ILC では LHC では見えないヒッグスの性質が発見できると考えられているだけでなく、LHC では検出できないヒッグス以外の新粒子や現象も ILC で発見できる可能性があります。



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 白井 淳平 教授* 末包 文彦 准教授 古賀 真之 准教授
三井 唯夫 准教授 清水 格 准教授 中村 健悟 講師 玉江 京子 助教 丸藤 祐仁 助教
池田 晴雄 助教 上島 孝太 助教 石徹白 晃治 助教 渡辺 寛子 助教

ホームページ <http://www.awa.tohoku.ac.jp/>

連絡先 022-795-6723 または office @ awa.tohoku.ac.jp

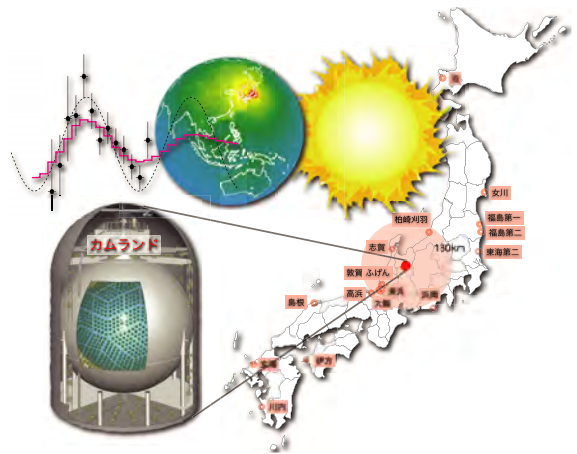
非加速器素粒子実験

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。

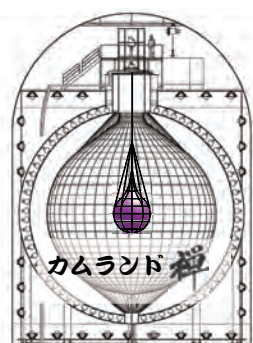
この検出器によって、原子炉からの反電子ニュートリノ観測を行い、ニュートリノの見かけの数が距離とともに減少・復元を繰り返す、ニュートリノ振動を2サイクル以上にわたって捉え、30年以上未解決であった太陽ニュートリノの謎を解決するとともに、ニュートリノ振動パラメータの精密測定を達成した。



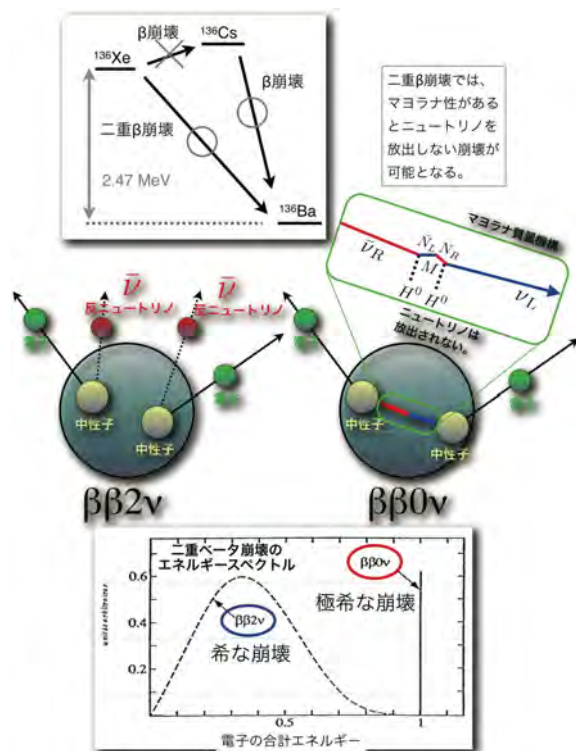
また、地球内部からのニュートリノの観測にも世界で最初に成功し、ニュートリノをプローブとして利用した地球内部の観測「ニュートリノ地球物理」を切りひらいた。このニュートリノは地球内部の放射性物質が崩壊する際に熱と共に放出するものであり、地球形成・発展の研究、地磁気生成、マントル対流といった地球ダイナミクスの研究への展開が期待される。今では、カムランドの観測精度向上により地熱に占める放射性物質の寄与の割合を検証できるようになってきているが、特に停止している原子炉が多い現状は地球ニュートリノ観測の精度向上に適しており、急速な発展が見込まれる。さらなるニュートリノ利用の実践として、太陽ニュートリノ観測に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2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。



KASKA/DoubleChooz 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（次図参照）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た。2011年11月に原子炉ニュートリノによる近距離でのニュートリノ振動の兆候を世界で始めて検出し、現在は θ_{13} と呼ばれる、最後まで謎であったニュートリノ振動角を次のように測定している。

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.090^{+0.032}_{-0.029}.$$

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混合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。また、世界の3カ所の原子炉ニュートリノ振動実験のベースラインの違いを利用した質量二乗差 Δm_{31}^2 の測定も行っている。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、 θ_{14} の検出をめざし、J-PARCでステラエルニュートリノ探索実験を準備中である。



原子核物理グループ

Experimental Nuclear Physics Group

小林 俊雄 教授* 田村 裕和 教授 中村 哲 教授

岩佐 直仁 准教授 関口 仁子 准教授 小池 武志 准教授

金田 雅司 助教 三輪 浩司 助教 三木 謙二郎 助教 永尾 翔 助教 (高教機構)

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

連絡先: tamura@lambda.phys.tohoku.ac.jp, 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。

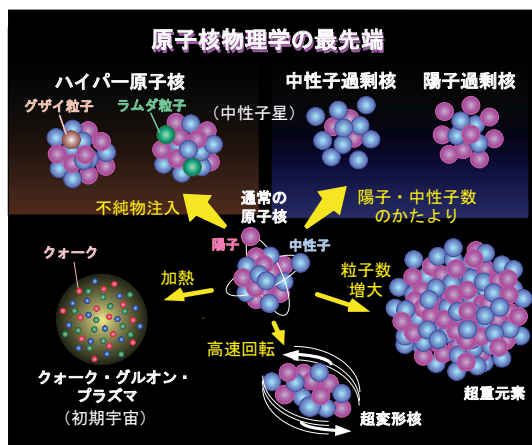


図1: 原子核物理学の最先端

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、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索として、原子核深部を探ることができる。また、ハイペロンによって引き起こされる原子核構造の変化には、原子核物理の常識を覆す興味深い現象が多い。一方、ハイパー核の構造からハイペロン・核子間の相互作用が明らかになり、核力をバリオン間相互作用へと拡張してこれを統一的に理解する道が開ける。また、中性子星内部の超高密度物質にはハイペロンが安定に存在し、中性子星はそれ自体が巨大ハイパー核になっていると予想されている。我々の研究はその解明につながる。

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での次期計画の検討とともに、ドイツマインツ大学のMAMI-C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準備している。(3) 本学電子光理学

研究センターの 1.3 GeV 電子加速器において、GeV 領域の γ 線ビームを重陽子に当て、生成される中性 K 中間子を我々の開発した中性 K 中間子スペクトロメータ (NKS2) で測定することで、電磁相互作用によるストレンジネス生成過程を調べる研究を進めている。

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。

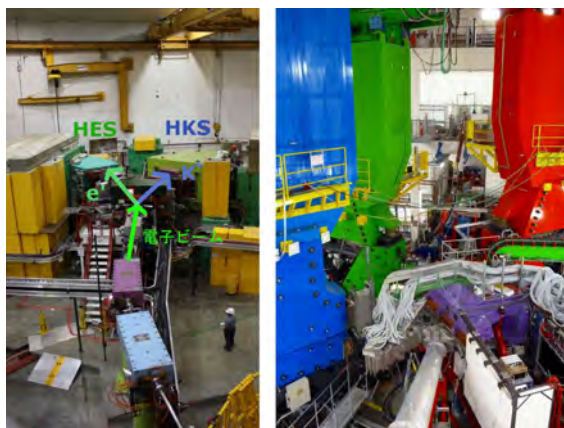


図 2: (左) 米国 JLab に設置した HKS および HES。 (右) ドイツ MAMI-C の Spek-A,B,C スペクトロメータ (赤, 青, 緑) と KAOS (紫)。



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. エキゾチック原子核と核力の物理

(1) RI ビームを用いたエキゾチック原子核物理

原子核を構成する中性子と陽子の比がアンバランスな中性子／陽子過剰核は、原子核の極限状態の一形態であり、ハイゼンベルグの安定線から離れた中性子／陽子ドリップライン近傍に存在する。これらのエキゾチック (不安定) 核は、中性子ハロー、中性子スキン、柔らかい巨大共鳴、魔法数の破れ等の、通常の安定核には見られない特異的な性質を持ち、恒星や超新星中での元素合成過程に重要な役割を果たしている。

当グループでは、このような不安定核の性質を RI ビームによる原子核反応によって理解する研究を進めており、理研、東工大と共同で、次世代加速器・理研 RIBF に SAMURAI と呼ばれる大型の多粒子磁気分析器 (図 4) を建設した。SAMURAI は 2012 年度に完成し、2013 年度より本格的な実験研究を開始したところである。



図 4: 理研 RIBF に我々が建設した多粒子磁気分析器 SAMURAI。

(2) 偏極ビーム・標的による 3 体力の研究

原子核の理解には、その元となる強い力である核力の理解が欠かせない。これまで核力は主に 2 つの核子の間を中間子が交換する事で説明される 2 体力として理解されてきた。近年、3 つの核子間に働く 3 体力も、原子核の束縛エネルギーや中性子星などにおいて、重要な役割を果たしていることが指摘されている。

当グループでは、3 体力を含む核力の統一的理解を目指して、理研 RIBF、東北大 CYRIC で偏極ビーム・標的の開発を行い、少数核子系の実験研究を遂行している。

3. 短寿命核ビーム物理

寿命が短い原子核 (短寿命核) の構造や宇宙での元素合成を研究するため、短寿命核を生成し、その崩壊や原子核反応を測定している。

(1) 短寿命核を核反応で励起し、励起エネルギーや換算遷移確率を求め、短寿命核の構造を研究している (2) 新星や超新星で爆発的に進行する陽子や中性子を捕獲する反応を、直接または間接的に測定し、重い元素の合成過程を調べている。 (3) 存在するとされる約一万種の原子核の約 2/3 は未知である。RI ビーム生成分離装置の高度化を進め、これらの同位体を探索している。

中間エネルギー核物理グループ*

Intermediate Energy Nuclear Physics Group

前田 和茂 教授* 神田 浩樹 助教

<http://nuclear.phys.tohoku.ac.jp/> e-mail:maeda.kazushige @ m.tohoku.ac.jp

中間エネルギー核物理グループは、光子・電子プローブを用い原子核内での中間子、核子、核子共鳴の振る舞い、さらには核子及び原子核内のクォーク自由度の役割を調べることで、ハドロ（強い相互作用をする粒子の総称）多体系である原子核を統一的に理解することを目指している。

光子は電流に応答する性質を持っている。この性質を利用し、原子核内の電流（陽子が運動することによる電流や、スピンによる磁化電流など）の空間分布を精密に調べることができる。電流の空間分布は原子核の構造を反映するので、原子核、及びその内部を詳細に調べることができる。電子プローブも同様に、仮想光子を原子核との間で交換する。仮想光子は、原子核の電流だけではなく電荷の空間分布を調べることができる特徴がある。私たちは、この光子や電子の優れた特徴を生かし、いろいろな波長の光子を使いながら原子核研究を進めている。光子の波長を変えることで、違った空間分解能で原子核に迫ることができる。

中間子、核子共鳴の物理

光の波長を短くする（光子のエネルギーを上げる）と原子核内の核子が見えるようになる。原子核内では核子同士が中間子を交換しながら衝突を繰り返している。更に波長を短くしてみると核子の共鳴状態が原子核の内部に作り出されるようになる。核子共鳴は核子の構造に由来している。光子は核子の内部自由度とも直接電磁相互作用することもできる。原子核内での核子共鳴の性質は自由空間の性質と違っているのだろうか？即ち原子核の中で核子の構造は自由空間での核子と同じなのか？現在この研究は原子核研究の重要なテーマである。本グループは、共鳴領域での全反応断面積の測定

や、共鳴の崩壊を詳しく調べる実験でこの物理に挑戦している。

クォーク・原子核の物理

核子の大きさよりも充分波長の短い高エネルギーの光子は、核子の構成要素であるクォークを直接“見る”ことができる。光子で原子核内の核子が調べられるように、核子内のクォーク構造を調べるため GeV 領域電子線による実験を進めている。GeV 領域光子は運動学的条件により $q\bar{q}$ を生成することが知られている。

近年の陽子ビームと重陽子標的を用いた実験で発見された特殊な共鳴状態が、核子と核子共鳴の間に働く核力および核子共鳴同士に働く核力によって生成されることが理論的に示唆され、6 個のクォークの等価な結合状態（ダイバリオン）であると期待されている。これは核子共鳴の物理とクォークの物理を繋ぐ興味深い現象であり、光子ビームと重陽子を用いてこの状態の探索と性質の測定を行なう実験を計画中である。

共同研究

私たちはこれらの研究課題を東北大学電子光理学研究センター、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター、高エネルギー加速器研究機構（つくば市）、ジェファソン研究所（米国）、マインツ大学（独）等にある加速器を用い、国内外の研究者との共同研究で行っている。

また、これら広いエネルギー領域で原子核研究の実験を行うために、本グループではエネルギー領域に応じた光子、中間子、陽子、中性子などを検出する測定器、光子ビームを生成してそのエネルギーを測定する光子標識化装置、標的に用いる重水素液化装置等の開発研究も行っている。

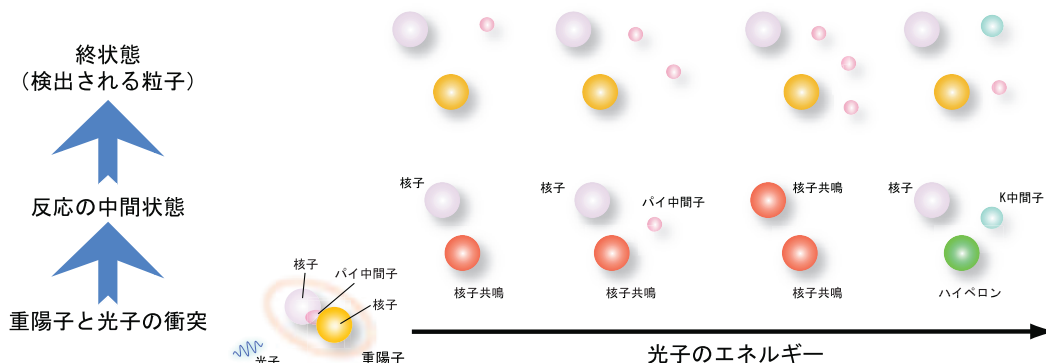


図1 最も単純な原子核である重水素と光子の反応による中間子生成。反応の中間状態と終状態に観測される粒子の構成が光子のエネルギーによって変化する様子が模式的に示してある。

原子核理学グループ

Nuclear Science Group

清水 肇 教授* 濱 広幸 教授 須田利美 教授

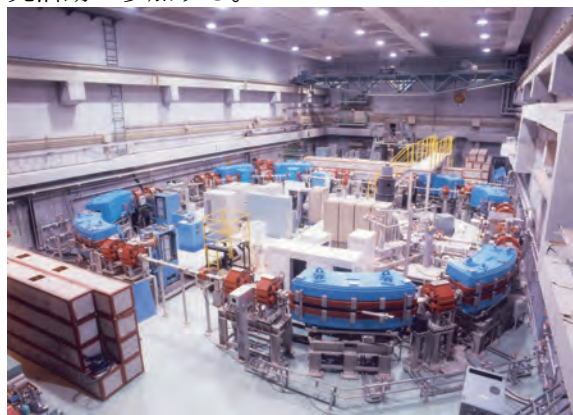
日出 富士雄 准教授 柏木 茂 准教授 村松憲仁 准教授 菊永 英寿 准教授

石川 貴嗣 助教 宮部 学 助教 武藤 俊哉 助教 塚田 暁 助教 時安 敦史 助教

<http://www.lns.tohoku.ac.jp/research/index.htm> 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 電子ブースターシンクロトロン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。



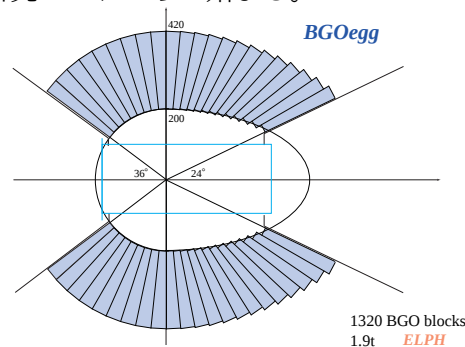
1.3 GeV 電子ブースターシンクロトロン

原子核・ハドロン物理学分野

1) クォーク核物理

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バリオン Θ^+ の発見は世界的な話題となり、今日に至っている。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、センターの加速器を用いてエータ (η) メソンの精密測定を行い、ストレンジネスを露わに含まないペンタクォークバリオンの候補を発見した。この研究では、全立体角を覆う電磁カロリメータ FOREST が重要な役割を果たした。電磁カロリメータは、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する検出器で、大がかりな装置である。(FOREST の総重量は 5 t) この研究を更に推し進めるために、新たに 1320 本の BGO 単結晶で構成される電磁カロリメータ BGOegg を建設した。BGOegg は SPring-8/LEPS2 に移設したばかりであり、これを駆使した本格的な研究がこれからが始まる。



電磁カロリメータ BGOegg

「粒子」と「真空」は相互規定的であり、ハドロンの研究と QCD 真空の研究は相補的である。原子核内部は、 1 cm^3 当たり約 1 億トンという超高密度の世界であり、これは開闢後間もない頃の宇宙の密度に匹敵する。そこでは QCD 真空が変化している可能性がある。GeV 光子ビームは原子核内部に進入することができるので、これを用いて原子核内部にハドロンを生成し、その崩壊を詳しく調べることによって、原子核中でのハドロンの性質変化を研究している。この研究は、物質質量の 98% を創成すると考えられている QCD 真空の相転移の研究に繋がっている。

2) エキゾチック核の構造研究

短寿命で崩壊するエキゾチックな原子核の中に、安定な原子核では知られていなかった特異な構造を有する原子核が多数発見されている。これは、安定核の研究を基に築かれてきた原子核構造に関する“常識”が、陽子・中性子数のバランスが大きく崩れたエキゾチック核では通用しないことを示している。これら特異構

造を解明し、適応範囲の広い核構造モデルを構築することは現代原子核物理学に課せられた最重要課題である。また多くのエキゾチック核が関与する核反応連鎖である宇宙での元素合成過程に、これらの核構造が大きな影響を与えることもあり、世界中の研究者が日夜その構造研究にしのぎを削っている。

電子を原子核に照射しその散乱具合から内部構造に関する知見を得る電子散乱は、原子核の構造研究にとって最良の方法である。それは電子が、1) 点状粒子であり、2) 電磁相互作用で原子核と散乱する、ためだ。原子核の教科書に書かれているように、(安定な)原子核の形状や大きさ、また核内核子の運動量分布など、原子核構造の基本的な物理量の多くは電子散乱実験によって決定されてきた。



世界初の短寿命不安定核研究用電子散乱施設と東北大スペクトロメータ

しかしながら、生成が困難で短寿命で崩壊してしまうエキゾチック核の電子散乱による研究は、原子核研究者の長年の夢だったがその標的生成があまりに困難なため不可能と考えられてきた。私たちはこの壁を打ち破りごく少数の標的エキゾチック核で電子散乱実験を可能にする画期的な実験技術を発明した。この技術をもとに理化学研究所と共同で世界初のエキゾチック核専用の電子散乱施設を建設しエキゾチック核の構造研究を進めている。

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およびブースター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。電子の電磁場における運動、特に非線形ダイナミクスを中心にビーム物理学の基礎研究を行っている。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高次共鳴および結合共鳴のビームダイナミクス、また航跡場による電子集団の縦方向位相空間の変形及び不安定性等を研究している。その他、新しい発想に基づいた超低エミッタンス電子銃および連続してコヒーレント放射光を得るため特殊なビーム光学に基づくアイソクロナスリングや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相互作用を研究している。



建設中の試験光源加速器の完成予想図

他研究機関との共同研究としては、理化学研究所 X 線自由電子レーザーグループと共に最先端の電子リナックを用いた超高輝度電子ビームの生成やコヒーレント X 線生成の基礎研究を行っている。海外ではブルックヘブン国立研究所(米)と共に X 線自由電子レーザーを中心とした光と電子の集団的相互作用の研究を進めているほか、台湾精華大学と熱陰極高周波電子銃の基礎研究およびレーザー光と電子ビームの衝突によるコンプトン後方散乱による X 線生成研究を進めている。

核・放射化学分野

光核反応機構の放射化学的研究や、環境物質等の放射化微量分析等の従来からの研究に加え、化学的手法を用いた原子核の崩壊特性や核反応・核データ等の研究を推進している。たとえば本分野では、放射性同位体体の半減期をおおきく変化させる試みとそのメカニズムの研究が進められ、最近、C₆₀ に内包された放射性 Be-7 の大きな半減期変化の観測に成功した。また、重イオン核反応を用いた超重元素の生成と核分裂のメカニズムや、サブ eV から MeV までの幅広いエネルギー領域でのアクチノイド元素の中性子捕獲核分裂の断面積測定等の研究を進めている。

核放射線物理グループ

Nuclear Radiation Physics Group

酒見 泰寛 教授 伊藤 正俊 准教授 原田 健一 講師 川村 広和 助教 井上 壮志 助教

松田 洋平 助教 田中 香津生 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 (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や原子核がラグビーボールのように変形した超変形状態など、極限量子状態の生成・消滅機構の解明 (3) 上記の研究のための AVF サイクロトロン加速器の高度化 (4) 多種多様な粒子による

研究を可能とするイオン源の開発研究等を行っている。

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。

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)

2009 年に J-PARC ハドロン実験施設 (図 1) に 50 GeV-陽子加速器からのビームが初めて導入され、陽子ビームに照射された生成標的から発生した π , K 中間子などの二次粒子が実験エリアに導き出され、最初の実験が開始された。J-PARC ハドロン実験施設では、世界最強の K 中間子ビームを用いて、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、ビームライン、スペクトロメータ系という実験のための基本的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・原子核物理学の研究を推進している。なお、2013 年 5 月の放射能漏洩事故を受けて、施設と組織の徹底した安全対策を進めた結果、運転再開後に

は安定運転が実現するとともに、次々に新たな実験成果が上がりつつある。

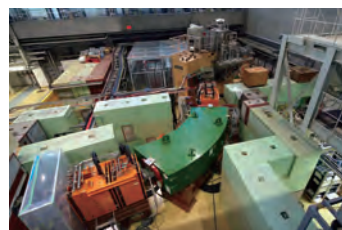


図 1: ハドロン実験施設に設置した二次ビーム分析器 (緑色) と超伝導 K 中間子スペクトロメータ “SKS” (黄色)。2 GeV/c までの π , K 中間子や反陽子を用いた高分解能実験のために準備した。

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。

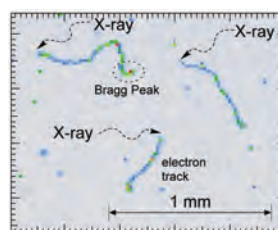


図 2: シリコン結晶中でのコンプトン散乱電子を、先進 LSI 技術による微細ピクセル型粒子検出器 (SOI Pixel Sensor) により観測 (視覚化) した画像。

光電子固体物性グループ

Photoemission Solid-State Physics Group

高橋 隆 教授* 佐藤宇史 准教授 中山耕輔 助教

相馬清吾 准教授 (WPI) 菅原克明 助教 (WPI)

<http://arpes.phys.tohoku.ac.jp/> Tel: 022-795-6417

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、高温超伝導体に代表される強相関電子系や、グラフェンなどのナノ構造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、グラフェン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) 新型スピン分解バルク敏感超高分解能光電子分光装置の建設と、トポロジカル絶縁体などのスピントロニクス関連物質の電子構造の解明
- (2) グラフェン(単層グラファイト)およびグラファイト層間物質の特異物性発現機構の解明。とりわけグラフェンにおけるディラックフェルミオンの振舞の解明
- (3) 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
- (4) 半金属および酸化物表面/界面における特異なスピン状態と電子構造
- (5) 金属超薄膜・細線における電荷密度波 (Charge Density Wave, CDW)、超伝導、スピン-電荷分離

さらに、国内外の放射光実験施設（米国ウイスコンシン放射光施設、SPring-8、高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory）で、放射光を利用した共同利用実験も行っている。

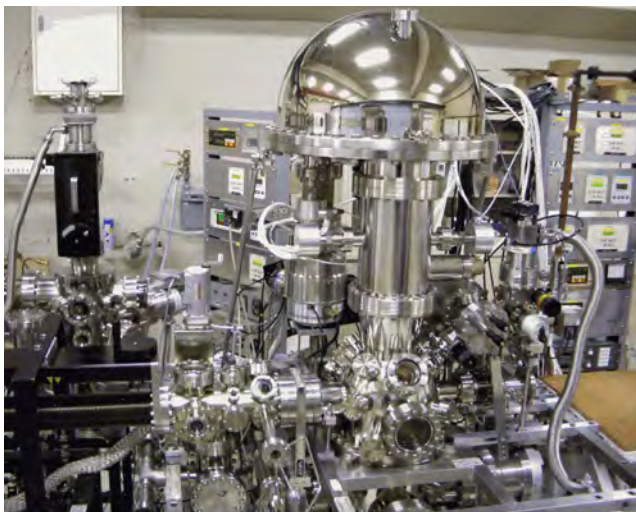


図1 東北大学に建設した世界最高水準のエネルギー分解能を有する超高分解能光電子分光装置。

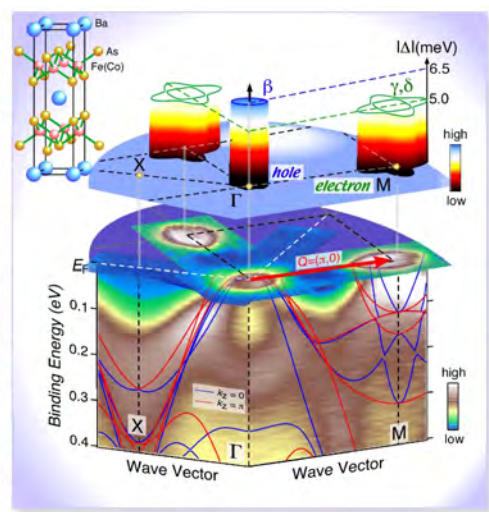


図2 角度分解光電子分光で決定した鉄系超伝導体のバンド構造 (下図) と超伝導ギャップの運動量依存性 (上図)。

ナノ固体物理グループ

Nano Solid-State Physics Group

谷垣 勝己 教授 下谷 秀和 准教授 田邊 洋一 助教 松下 ステファン 悠 助教

平郡 諭 助教 (WPI)

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

近年の物性物理の進展は、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。

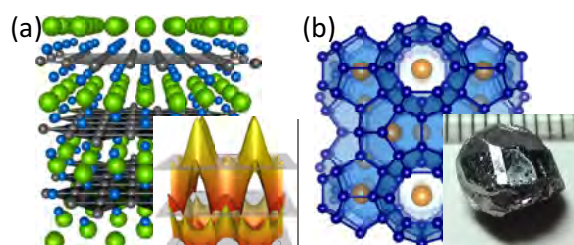


図 1. (a) 鉄系超伝導体の幾何対称性から生まれる特異な電子状態（ディラック・コーン）。(b) クラスレート化合物の結晶構造と結晶の写真。シリコンやゲルマニウム（青色の球）でできたナノ空間中に閉じ込められたバリウム、ストロンチウム、ユーロピウム等の金属原子（オレンジ色の玉）が非調和フォノン物性を発現させる。

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、磁性はスピンにより作りだされる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間接的な介在を経ること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。直接相互作用に対して、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もある。

当研究室では、軽元素ならびに d-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（ユビキタス元素）炭素 (C) により構成される C_{60} やグラフェン、Si/Ge から構成される $(Si/Ge)_{20}$ および 3d-2 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）。同時に、得られる基礎的な理解にもとづき、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。

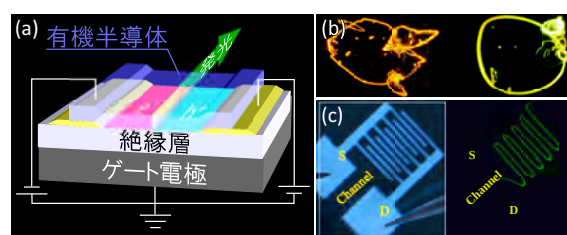


図 2. (a) ゲート電極を用いた電界効果を利用して有機半導体中で電子・正孔の再結合を生じさせる素子構造（有機発光電界効果トランジスタ）の模式図。(b) 有機半導体結晶からの発光。分子の種類によりさまざまな波長の発光を実現できる。(c) 左図：有機半導体薄膜を用いた発光電界効果トランジスタ（上面図）。右図：同素子からの発行の様子。

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} 個も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。

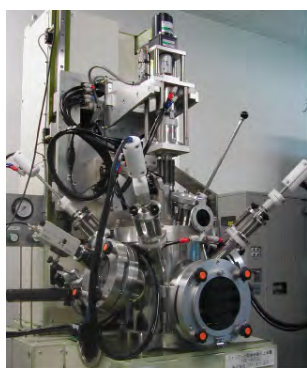


図１：新物質開発用テトラーク炉. 純良結晶の育成に用いられます。



図２：トップロード式希釈冷凍機. 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。

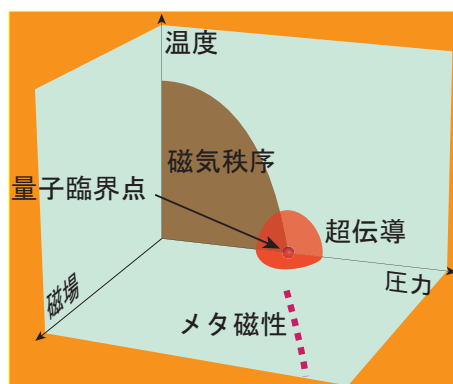


図３：強相関電子系磁性体の温度-圧力-磁場相図. 圧力により磁気秩序が抑制されると、秩序温度が絶対零度になる量子臨界点が現れます。

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 富安 啓輔 助教

<http://web.tohoku.ac.jp/mqp/> e-mail: ohgushi@m.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。

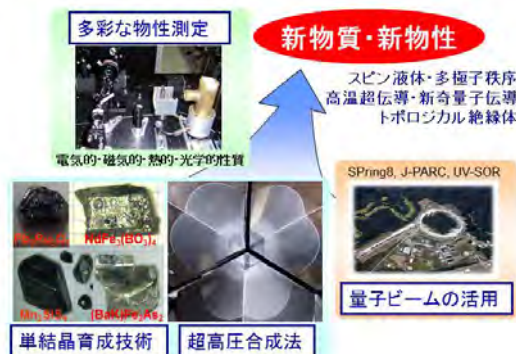


図 1 : 研究の概念図.

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 線散乱や中性子散乱など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. 鉄系超伝導体の輸送現象・光物性の研究および物質開発。
2. 電気八極子・磁気四極子など奇パリティ多極子の関与する量子物性の研究。
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。

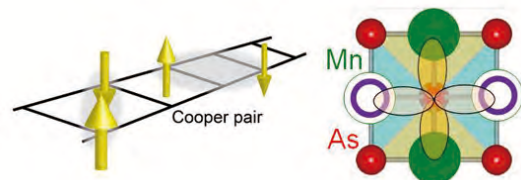


図 2 : 梯子格子における超伝導 (左) と磁気四極子秩序 (右) .

ミクロ物性物理グループ

Microscopic Research on Magnetism Group

高木 滋 准教授

<http://www.nhpm.phys.tohoku.ac.jp>, e-mail:takagisg@m.tohoku.ac.jp

はじめに：固体中の強く相互作用しながら運動する電子系(相関の強い電子系)は物性物理の中心的課題で、多くは低温で磁性や単純ではない超伝導などの秩序を示します。何ら秩序を示さず絶対零度まで大きい量子揺らぎを示す場合もあります。電子はスピン(ミクロ磁石)の自由度を持ち、これが磁性の起源です。電子はこの他に軌道の自由度も持つため、スピン軌道相互作用により2つの自由度が強く結合するとさらに多彩な振舞が現れます。スピンと軌道が強く結合した、相関の強い電子系の示す単純ではない exotic な秩序、揺らぎを、原子核のスピンを探り針(プローブ)とする核磁気共鳴法(NMR)を主要手段として研究しています。

研究対象：現在以下の研究を行っています。

(1) スピン液体：通常スピン系は、スピン間の交換相互作用程度の温度になると空間的に規則的に配列し秩序します。しかしスピンが3角形を基本構造とするような格子を組みかつ反強磁性相互作用をしていると、なかなか秩序配列が取れない(磁氣的 frustration)ということが起こります。特にスピンが1/2で量子揺らぎが大きいと絶対零度まで秩序しない可能性があります。スピンの向きがあたかも液体中の原子位置のように揺らいでいることから、スピン液体と呼ばれる量子状態です。このような状態を遷移金属元素 Ir の酸化物で研究しています。

(2) スピンのない電子系：希土類元素、アクチナイド元素の化合物で非常にうまい状況をつくると、低温でスピン以外の自由度のみを持つ電子系が実現できます。スピン以外の自由度というのは図1に示す、電荷の異方的分布である4極子や、1つの原子内でミクロ磁石が複雑に交差している8極子などです(総称して多極子)。通常のスピン系でスピンが低温で規則的に配列し秩序するように、結晶中ではこれらの多極子自由度が低温で規則的に配列して秩序することがあります。また伝導電子との相互作用により秩序せず絶対零度まで大きい量子揺らぎとして残る可能性もあります。これらは新たな量子状態で、伝統的な磁性物理の諸概念を一般化するものです。このようなスピン以外の自由度のみを持つ電子系の秩序、揺らぎを希土類元素 Pr, Tm の化合物で研究しています。

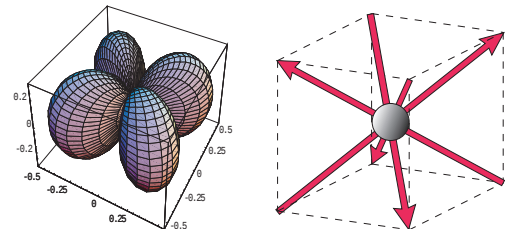


図1：4極子(左)と8極子(右)の例

(3) 隠れた秩序：巨視的物性から何らかの秩序があることはわかっているものの、いったい何が秩序するのが永年謎の物質があります。秩序変数が不明なことから隠れた秩序と呼ばれます。中でもアクチナイド化合物 URu_2Si_2 が示す秩序は非常に手強く、最先端の種々の手法を駆使した世界中での研究にもかかわらず、発見以来30年経つ現在も未解明の謎です。NMRで極く微少ですが有限の内部磁場が観測されることを手掛かりにこの謎を究明しています。

研究手法：上記の研究を進めるうえでは純良結晶を育成することが重要です。テトラアーク単結晶育成炉などがあります。磁化、比熱、電気抵抗などの巨視的物性の測定に加え、微視的な測定手法であるNMRを駆使して研究しています。原子核のスピンは適度な強さで電子系と相互作用しており、この適度さゆえに電子系のクールな、しかも予め植え込まれたプローブとして電子状態につき非常に有益な情報を提供してくれます。



図2：14T 超伝導マグネット(手前床下)と
NMR スペクトロメーター

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/> ; matsui_ldp@m.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、電子、或いは生体分子の動的な伝導・誘電特性（ダイナミックス）を研究しています。ナノ空間の形状や大きさに依存して、水素結合を媒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です。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）ナノ空間中にある水分子ネットワークの水和状態、プロトン伝導特性、および水分子ネットワークに内包させた生体分子の超広帯域伝導・誘電特性の研究。

（2）水素結合系混合原子価レニウム錯体におけるプロトン-電子連動現象。

（3）乾燥DNAフィルム、およびコラーゲンフィルムの燃料電池電解質としての基礎研究。

（4）新しい固体燃料電池電解質の開発に向けたプロトン輸送の解明。

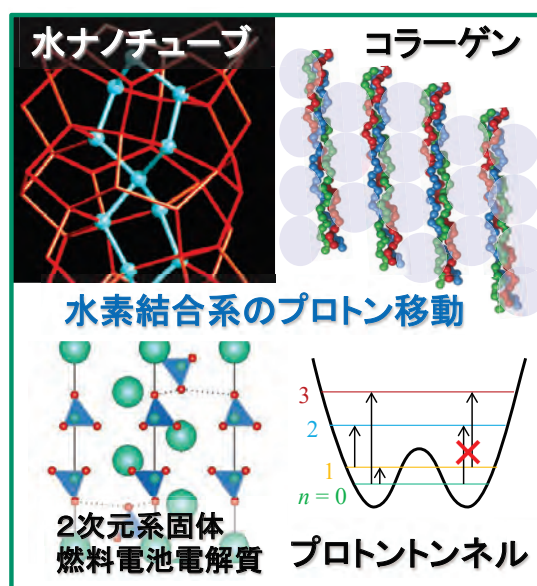
（5）ナノ空間に内包された水分子ケージ中へのガス吸蔵の探索。

上記事柄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。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！これらの電磁波は、プロトン、水分子、生体分子、低エネルギー電子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。さらに、微小試料の顕微遠赤外分光測定を高輝度放射光施設 SPring-8 で進めており、新たな知見が得られています。

我々がもつ高周波技術を最大限に活用するため、多くの大学、企業などとも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発展を目指しています。また、糖、タンパク質の単結晶試料を作製することは、一般に困難ですが、そうした物質を、ナノ空間に閉じ込め、規則性の高い配列構造をもつ試料の研究も始めています。今後、積極的にナノ空間を利用した研究を展開し、応用も探ります。

私たちの研究室は、伝統的な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、将来多様な分野、社会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 鈴木謙介 助教 池田陽一 助教

<http://www.qblab.imr.tohoku.ac.jp/>(連絡先: qblab@imr.tohoku.ac.jp)

研究室紹介

スピン構造物性グループは2014年1月に立ち上がった新しい研究室です。スピンを主体とする量子現象の研究展開を図るべく、“うごき”と“はたらき”をキーワードに、スピンドायナミクスと物性の発現機構の関係を研究しています。特に高温超伝導研究に精力的に取り組んでおり、高品質な単結晶の作成と量子ビーム実験を組み合わせたユニークな手法で機構解明を目指しています。二台中性子散乱装置を管理、運営し、中性子散乱とミュオン測定という磁性研究の強力なプローブを専門とする教員が伴に存在する大学研究室としては日本初かつ唯一です。

研究テーマ

本研究室では、強相関電子系と呼ばれる物質群を主な研究対象としています。この系では、固体内の電子同士がお互いの存在を強く意識し合い、その結果、思いも寄らない物性や機能を発現することがあります。複雑な人間関係にも似た、強相関電子系の魅力的で多彩な現象の背後にある相関関係を解き明かし、発現機構の理解を通じた新しい物理の創成を目指しています。たくさんの研究テーマがありますが、今年度は以下に挙げるテーマを中心に研究を進めていきます。

- 電子ドーピング銅酸化物超伝導体のスピン揺らぎ
- フラストレート磁性体における新奇磁気相
- 次元性を跨いだ鉄系超伝導の理解
- 低次元量子スピン系における誘起磁性
- スピン軌道相互作用系のスピン揺らぎ

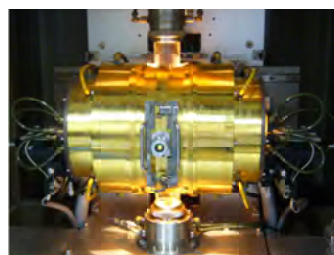
量子ビームの複合利用による最先端研究

銅酸化物における高温超伝導の発現には、スピンと電荷の自由度が関係しています。超伝導機構の解明には、骨格となる基本構造の決定だけでなく、スピンや電荷のダイナミクスに関する知見を得ることが極めて重要です。本研究グ

ループでは、構造とダイナミクスの研究ツールとして広い時空間スケールでの測定が可能な中性子散乱法を駆使し研究を展開しています。また、ミュオンや放射光X線などの量子ビームを使った実験も主体的に行っており、相互作用の決定、相関関係の解明に量子ビームを複合的に利用することが本グループの特徴のひとつです。これら量子ビーム実験は国内外の多数の大型施設を利用して行います。

自ら創る

目に見えない相互作用、相関関係を調べるためには創意工夫が必要です。本研究グループでは、中性子散乱の専門グループとして中性子研究の新しい手法開発にも取り組みます。また測定を行うためには良質の試料が欠かせず、このために単結晶の作成も独自に行っています。誰も行ったことのない装置の開発や物質の結晶化は、科学の発展を先導する新発見の原動力となります。また院生という研究者の種も、世界中の研究者との共同研究の中で育まれて行きます。このために、院生生活を通して、物理的に物事を考える力を身につけ、研究の楽しさを味わえる環境をスタッフは最大限の努力で提供します。目的を伴にし相互に関わりを持った個々の活動から、新しい“モノ”を創っていきます。



結晶育成装置と作成の様子、および作成した単結晶群

強磁場物性グループ

High Magnetic Field Condensed Matter Physics Group

野尻 浩之 教授 茂木 巖 助教 木原 工 助教 平田 倫啓 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。こうした相転移現象を研究します。

- 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。

2. ナノテクノ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)をもつ物質群で、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。

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。

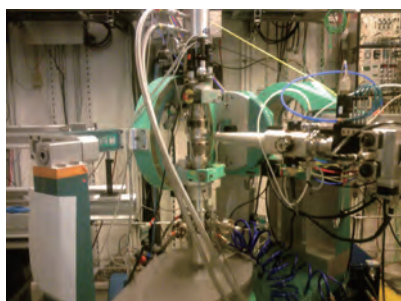
- 自分で世界1の装置を作ろう

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。

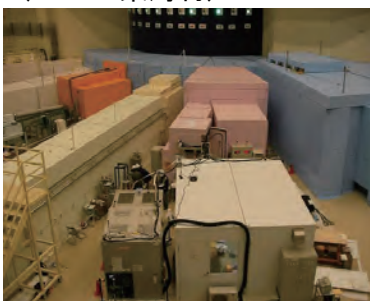
- 強相関物質から分子磁性体まで

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、自ら考えながら研究を進めてゆきます。

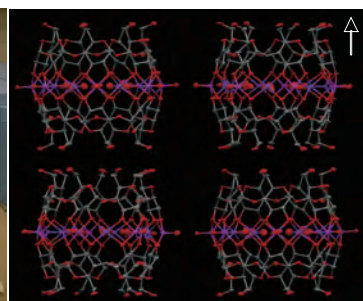
超強磁場 X 線装置 (APS シカゴ)



超強磁場中性子回折装置 (J-PARC 東海村)



スピンナノチューブ



低温物質科学グループ

Low Temperature Materials Science Group

野島 勉 准教授 中村 慎太郎 助教

<http://ltsd.imr.tohoku.ac.jp/> e-mail: nojima@imr.tohoku.ac.jp tel: 022-215-2167

本グループでは、低温において顕著にその特性が現れる超伝導体や強い相関を持った電子系における電子物性の研究を行っています。これらの物質が低温で示す物理現象を解明するだけではなく、通常では存在し得ないような試料や電子状態を作り出すとともに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 10mK - 300K）・磁場中（0 - 14T）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、磁場中新奇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) 電界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界を用いて、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誘起し、そこで創生される新超伝導物性を研究しています。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磁場中超伝導現象、強電場により実現可能な高温超伝導体のキャリアの電子・ホール両極性ドーピングに関わる物理現象に注目しています。

(2) 高温超伝導体の特異な磁場中特性

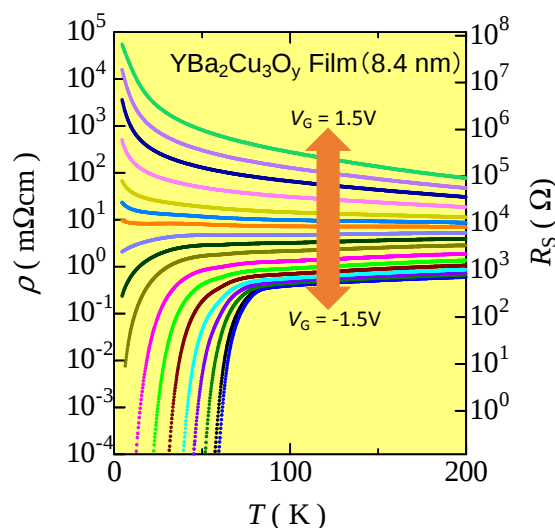
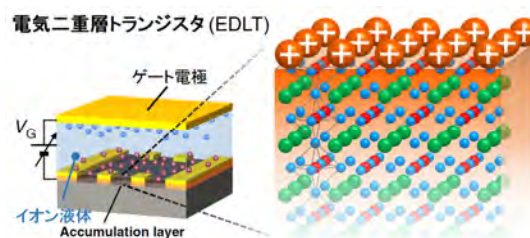
銅酸化物、二ホウ化マグネシウム、鉄砒素系化合物といった高温超伝導体では、大きな熱ゆらぎ効果やマルチバンド（複数の超伝導ギャップ）の効果により、従来型の超伝導体には顕著にされなかった渦糸状態（磁場中超伝導状態）が観測されます。磁気トルクや磁化、磁気抵抗という測定手段で、その特性解明を行っています。

(3) 希土類化合物の極低温物性

(Ce,La)B₆ 等の多重極子相互作用と近藤効果の共存に起因する新しい磁気相および絶対 0 度付近での量子状態の研究を、極低温下での磁化、電気伝導、超音波の測定により行っています。

● 役に立つ実験装置開発

極低温下で物性測定を可能にする実験装置の開発も行っています。装置開発の経験は実験技術の取得や向上だけでなく、物理現象を広く理解する上でも大いに役立ちます。



(上) 電気二重層トランジスタ (EDLT) 構造の概念図と (下) EDLT 構造を用いた 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 橋本颯一郎 助教 伊藤桂介 助教

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

本グループでは有機分子の集積によって構成されている分子性物質を研究対象とした物性実験研究を進めています。分子で構成されている有機物質の特徴は“やわらかい”ことです。この特長から、近年、有機 EL デバイス、有機トランジスタなどの軽量で“曲がる”エレクトロニクス材料としても注目されています。このような分子性有機物質の基礎的電子物性現象(強相関電子による金属-絶縁体相転移、超伝導発現、量子的スピン-電荷液体など)の解明、新奇な物性の発見、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る複合的な“やわらかい”電子-スピン-格子結合の自由度を持っています。そしてこの“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問題にチャレンジしています。現在、以下のようなテーマに取り組んでいます。

“やわらかい”分子性有機導体の電子相制御

強相関電子系の物性研究におけるもっと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。モット絶縁体転移と電荷秩序絶縁体転移は、その中でも最重要な中心的課題です。有機物質系は特徴的な柔らかい分子格子を有するために、圧力印加や分子置換によるバンド幅の制御、冷却速度やエキス線照射などによる乱れの制御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。最近、私たちはエキス線照射による分子欠陥の系統的な導入手法を開発し、分子性強相関電子系における乱れによるアンダーソン転移とモット転移の間の協力・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。

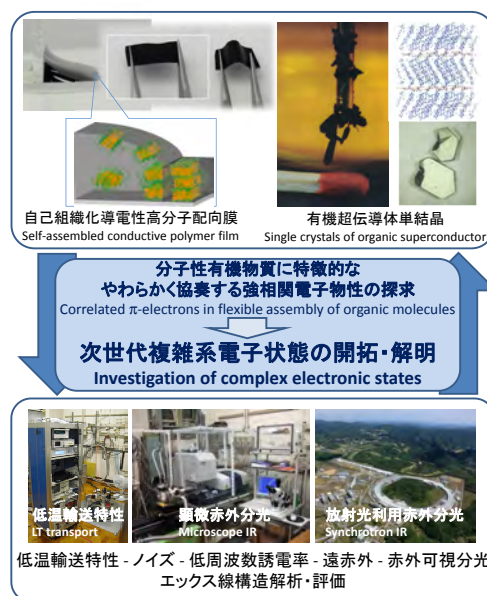
新しいタイプの電荷-スピン-分子格子自由度の結合による電子誘電性の創出

分子性物質の大きな特徴は、大きく広がった分子軌道と電荷分布のために、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、分子ダイマー構造をとる κ 型 BEDT-TTF 系有

機導体では分子ダイマー上の電荷分布に特徴的な自由度があり、直流の電気抵抗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は集団運動的な応答をするようになります。このように分子性物質が本質的に持っている“やわらかな”電荷-スピン-格子結合と複合的な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、柔らかく曲がる特性から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、構造の階層性に着目した成膜手法の開発から構造解析、電子状態解明を進めています。



強相関電子系分子性導体(有機超伝導体)、導電性高分子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 講師 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、非平衡プロセスである超高真空中での薄膜作製手法を駆使して、人工的超構造の創成と界面物性研究を行っています。特に、量子ホール効果に代表される量子輸送現象に着目しており、2次元電子系を形成する新規物質群の探索と実証研究を展開しています。さらに、デバイスプロセスを通した電界効果素子開発によって、極薄膜における2次元的な超伝導やある種の物性における転移温度の電界変調などを行っています。近年では、強相関系酸化物薄膜や有機単結晶においても電界効果の適用によって精密な伝導度制御が可能となっており、新奇物性探索の研究対象として注目されています。

我々は、独自の高品質薄膜化技術を使って、新しい機能界面を自身で作ることから新しい物理への展開を目指していますので、日々の実験の中にも些細な発見が潜んでいます。意欲的な皆さんと新たな発見に向けた研究に取り組めることを楽しみにしています。ぜひ、薄膜・界面のナノテクノロジーを使った合成から先端物性評価までの一連の研究にチャレンジしてみてください。現在、界面2次元系の量子輸送現象に着目した、以下のような研究に取り組んでいます。

(1) 自発分極変調やバンドエンジニアリングによる界面電子系の形成と量子輸送現象

ウルツ鉱型物質群は、結晶構造に起因して自発分極を持つことが知られています。当研究グループでは、これまでに酸化物半導体の一つである酸化亜鉛 (ZnO) を用いた薄膜積層界面において、分子線エピタキシー装置を活用して世界最高移動度を達成し、整数量子ホール効果や分数量子ホール効果の観測を行ってきました。これら酸化物では従来の半導体とは異なり、強い電子相関やスピン軌道相互作用の効いた界面物性の発現が期待されます。現在、物質系の拡張とともに、半導体デバイス学理との融合による新たな界面電子系の創出に取り組んでいます。

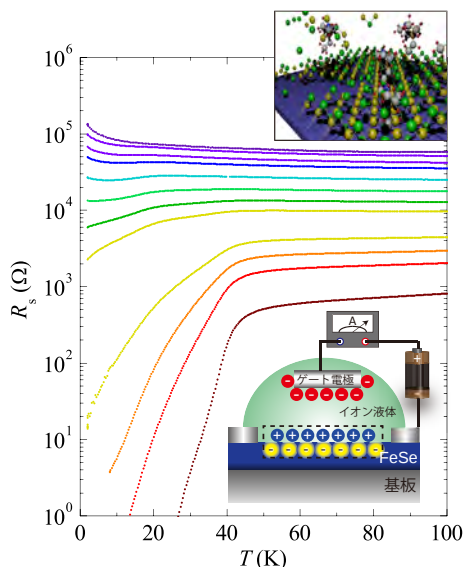
(2) 電界効果による物性変調

外場による伝導性制御やある種の転移温度制御は、物性の背後に潜む物理起源を調べる上

で非常に有用な手法の一つと言えます。特に、強相関系の遷移金属酸化物や量子輸送現象に関連する2次元電子系界面では、外場で電荷密度を制御することによって、関連する物性も変調されることがあります。このような変調現象における支配的な因子を調べることで、物理起源に迫ろうとする研究を行っています。最近では、固体絶縁体を用いた素子構造だけでなく、イオン液体などを用いた高濃度電荷制御にも取り組んでいます。特に、イオン液体による高濃度電荷制御と化学エッチングを駆使して、極薄膜化した鉄系超伝導体の示す、特異な高温超伝導の起源を探る研究を進めています。



分子線エピタキシー装置 (左) とホール効果素子及び透明酸化物導電膜 (右)



FeSe 極薄膜における電界誘起超伝導と極薄膜化の模式図

強相関電子物理学グループ

Strongly Correlated Electron Physics Group

山本浩史 教授 (委嘱)¹ 寺嶋太一 教授 (委嘱)² 組頭広志 教授 (委嘱)³

¹yhiroshi@ims.ac.jp ²TERASHIMA.Taichi@nims.go.jp ³hkumi@post.kek.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。

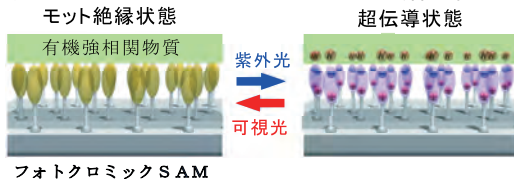
山本浩史: 実は、有機化合物は強相関電子系の宝庫である。有機物を使って強相関電子系の物理をやるメリットはいくつもあるが、特に重要な点は、

(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。

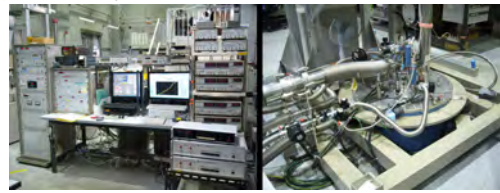
の3点が挙げられる。本研究グループでは、有機モット絶縁体と呼ばれる強相関電子系物質を用いて、新しい有機デバイスを作ること、そしてそのデバイス特性を測定することによって強相関電子の新たな一面を解明し、物性物理の基礎学理を深めることを目的として研究を行っている。例えば、有機モット絶縁体を用いてFET(電界効果トランジスタ)を作ると、低温においてゲート電圧や光照射で超伝導転移を起こすことができる。このメカニズムの詳細を今後さらに解析し、新しい物性物理の開拓と新しい電子デバイスの創出を目指す。



光による超伝導のスイッチング

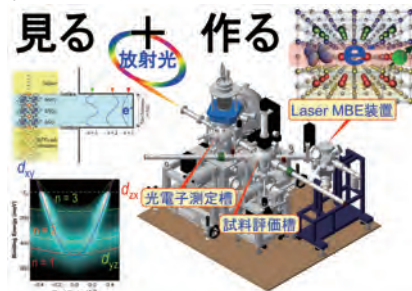
寺嶋太一: 物質・材料研究機構強磁場ステーション(つくば市)を利用して、鉄系超伝導体等の超伝導体、CeやUを含む強相関物質の電子状態、超伝導、磁性などを研究する。とりわけ量子振動測定に力を入れている。量子振動とは、電子の磁場中での運動がランダウ量子化を受けることに起因し、磁化、電気抵抗等が磁場の関数として振動する現象であり、フェルミ面、有効質量などの電子状態に関する詳細な情報

が得られる。測定には強磁場だけでなく、超低温も必要であり、我々の20テスラ超伝導磁石・希釈冷凍機システム(図)の場合、試料は絶対温度0.03 Kまで冷却される。また、3万気圧までの高圧力で電子状態をチューンした測定も可能である。これらは世界でもトップクラスの性能である。



20 テスラ超伝導磁石・希釈冷凍機システム

組頭広志: 強相関酸化物と呼ばれる遷移金属酸化物の中には、高温超伝導や巨大磁気抵抗効果などの驚くべき物性を示すものがある。いわば「天才児」達である。その秘密は、電子同士がお互いに強く影響し合う状態にある「強相関電子」にある。近年、これらの強相関酸化物をベースにした量子井戸などの人工構造を作製することで、この強相関電子を制御しようという研究が固体物理学の大きな潮流となっている。当研究室では、この「天才児」の振る舞いを、高エネルギー加速器研究機構の放射光施設 Photon Factory からの放射光を用いて研究している。具体的には、放射光を用いた先端計測(光電子分光・内殻吸収分光など)という「見る」技術と酸化物分子線エビタキシー(MBE)という酸化物を原子レベルで制御しながら「作る」技術を高いレベルで融合することにより、強相関酸化物の物性を設計・制御しながら新しい量子物質の創成を目指している。



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。

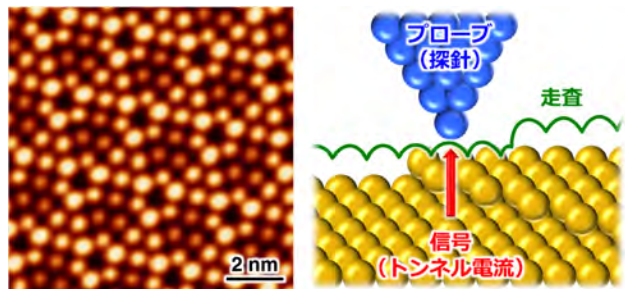


図1. シリコン表面の STM 像

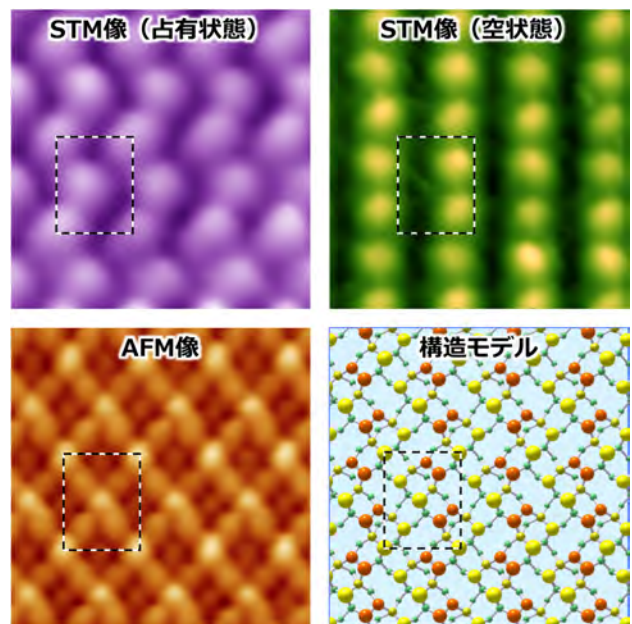


図2. Ge 吸着 Si 表面の STM 像と AFM 像

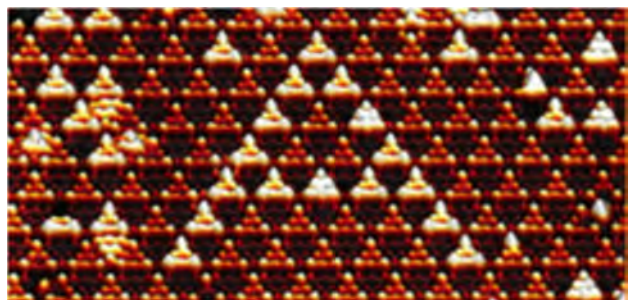


図3. 個々の Ag 原子の操作

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

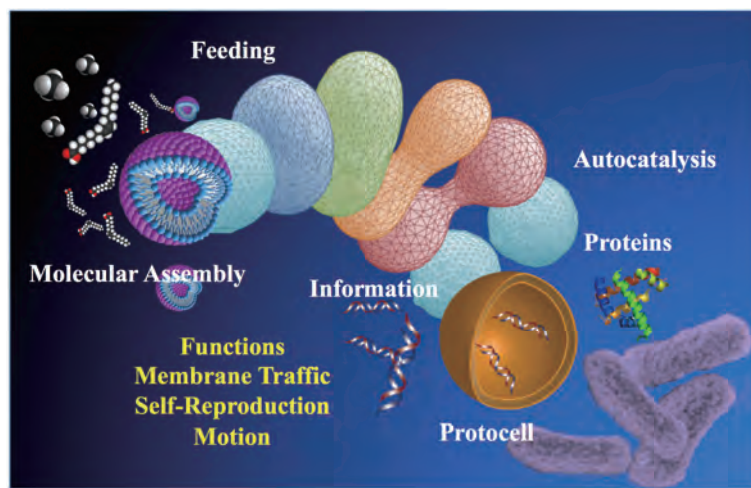
<http://www.bio.phys.tohoku.ac.jp/>

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。さらに最近は、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 50Hz 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。この分野は細菌発酵が著しいため、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

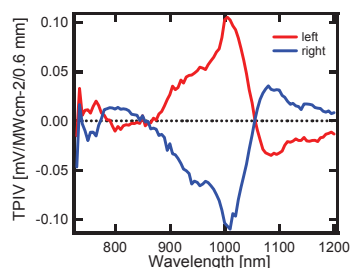
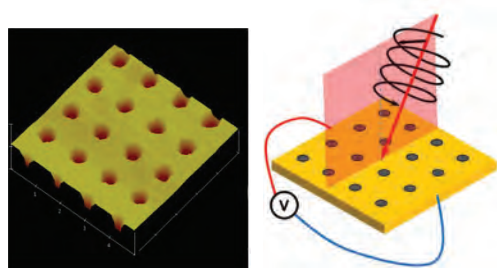
<http://sspp.phys.tohoku.ac.jp/> email: t-ishihara@m.tohoku.ac.jp

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



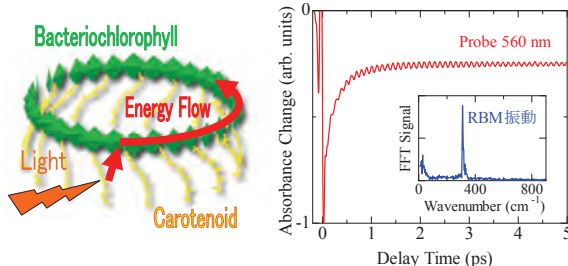
作製した金属フォトニック結晶の原子間力顕微鏡イメージ（上左）と光起電力測定配置図（上右）。円偏光励起光起電力スペクトル（下）。円偏光の向きによって逆向きの起電力が発生する。

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、負の屈折率の実現、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 M. H. Fauzi 助教 富松 透 助教

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

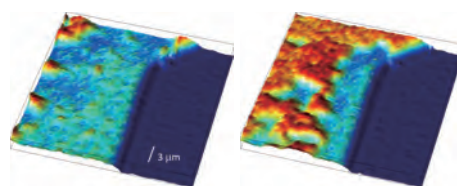
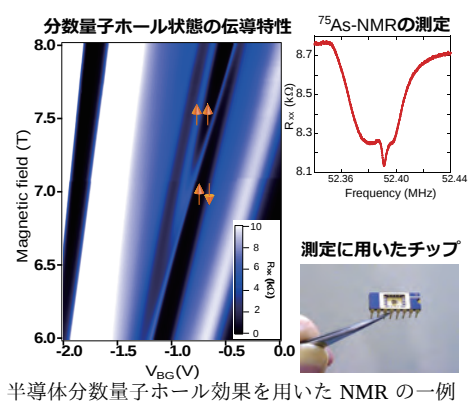
エレクトロニクス産業は半導体デバイスにより支えられています。ナノテクの進歩で線幅が 100 ナノメートルを切る半導体製品も出てきました。これらの半導体は工学上重要であるのみならず、物理を研究する上でも格好の舞台を提供してくれます。ナノスケールの半導体ではデバイスサイズが電子の波長程度の大きになり、量子効果が顕著に表れ、新たな物理現象が現れてくることが予想されています。

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の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などの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。



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 (高教機構) 川上洋平 助教

<http://femto.phys.tohoku.ac.jp> s-iwai@m.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、よりアクティブでダイナミックな領域へと広がりつつあります。このような展開は、光を用いた物性物理や材料科学への新しいアプローチであると同時に、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に沿ったものです。本研究室では、世界最高レベルのフェムト秒 (fs) パルスレーザー光、テラヘルツ (THz) 光などの最先端のレーザー技術を駆使して、物質中の電子やスピンの秩序やフォノン (格子振動) の光マニピュレーションに挑みます。物質開拓や理論の研究グループとの共同研究により、絶縁体-金属転移のほか、強誘電性、強磁性、超伝導など様々な物性の超高速光制御を実現し、物性物理と光科学を結ぶ新しい領域の開拓を目指します。

(1) 強相関電子系における光誘起相転移の探索

有機分子性結晶、3d 遷移金属酸化物などの強相関電子系における光誘起相転移 (光によ

る電子的、磁氣的秩序の融解や再構築) の探索を、広帯域 (可視~中赤外) 100 fs 分光によって行う。

(2) 赤外モノサイクルパルス (< 10 fs) による光誘起相転移初期過程の解明

赤外光領域において世界最短のパルス (電場振動の 1~3 サイクル) 光源を開発し、光誘起相転移の初期過程 (光照射によってつくられるコヒーレントな電子分極が、電子間相互作用や電子-格子相互作用を経て、電子相転移や構造相転移へ至るダイナミクス) を超高速スナップショット観測により明らかにする。

(3) 広帯域、高強度 THz 過渡分光による、光誘起相の電子状態の解明と制御

THz 領域のポンププローブ分光によって、電荷やスピン秩序の集団運動やフォノンに関係した低エネルギー励起の観測と光制御をおこなう。

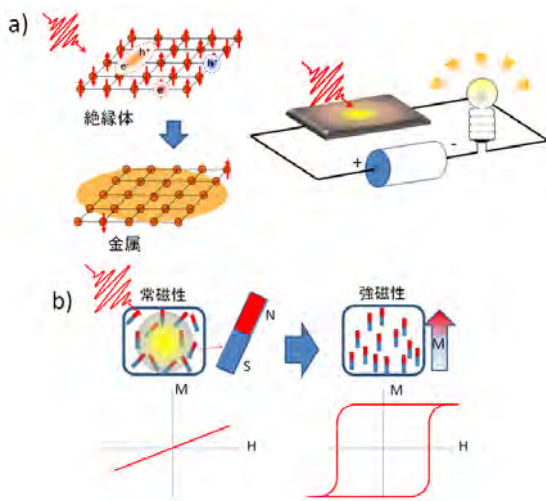


図 1: 光誘起絶縁体-金属転移 (a) と光誘起磁気転移の模式図 (b).

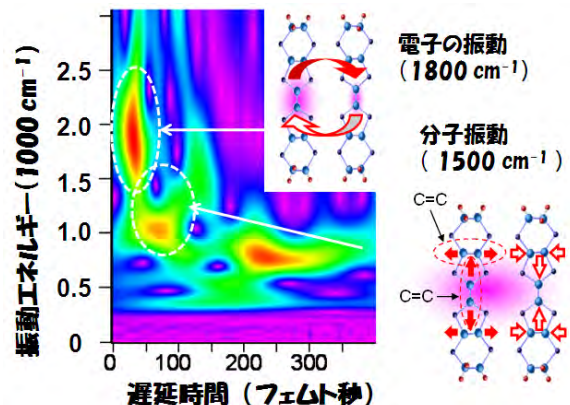


図 2: 光励起直後の電子や原子の超高速スナップショット.

まず電子が分子間を激しく振動し (< 50 fs), その後、その振動が原子へと伝わっていく。

格子欠陥・ナノ構造物性グループ*

Lattice Defect Physics Group

米永 一郎 教授* 大野 裕 准教授 沓掛 健太郎 助教 出浦 桃子 助教

<http://lab-defects.imr.tohoku.ac.jp/> E-mail: yonenaga @ imr.tohoku.ac.jp

物質は、原子スケールで見ると不完全です。ナノスケールで構造が乱れており、それが欠陥です。密度は高々 10^{-6} ですが、物質の性質を支配します。我々は、点欠陥、転位、粒界などの欠陥の成因と性質を多角的に解明する学理の探求と、その固有な物性を積極的に制御し物質の高性能化・新機能化を進めて次世代産業への実用化を目指す欠陥制御科学を行っています。

研究対象：

基盤的半導体 (Si、Ge)、新規機能性半導体 (SiC、(In, Al, Ga)N、ZnO)、太陽電池用 Si 多結晶に含まれる転位、粒界、点欠陥など。

研究項目：

欠陥の原子構造・電子状態とその発生・変性のダイナミクス、さらに個々の欠陥の諸物性のナノスケール直接評価など、マルチスケールで、分野を超えて総合的に解明しています。

研究展開：

得られた知識を基盤とし、欠陥単体および異種欠陥の相互作用による欠陥の密度や物性、粒界の成長制御、さらに欠陥を制御した結晶や薄膜の育成に取り組んでいます。

最近の成果：

次世代材料と期待される無転位 Ge や SiGe 単結晶の世界に先駆けた育成、青色発光材料の GaN や ZnO 中の転位の局在電子状態の定量化、SiC や AlN 中の転位の動特性の解明など。

(1) 格子欠陥の構造・電気・光学的性質の解明：原子構造・電子状態を調べ、欠陥の構造とその物性の基盤知識を確立しています。(図 1, 2)

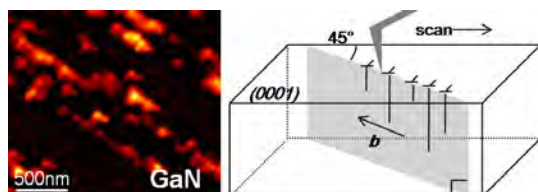


図 1. ナノスケール導線として働く GaN 中の転位。左図中の輝点が導電的な転位。

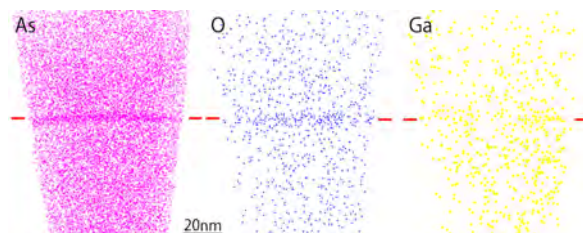


図 2. 3次元アトムプローブ法による Si 中の粒界近傍の不純物解析。As、O、Ga の析出の観測例。

(2) 格子欠陥のダイナミクスの解明：格子欠陥の発生と変性の過程、欠陥同士の反応の観察、その機構の解明により制御します。(図 3)

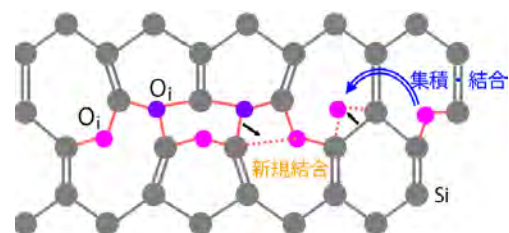


図 3. Ge 中の酸素 (Oi) の集積によるドナー形成・成長モデル。

(3) 不完全性の科学の確立と制御技術の探索：上記知識を基盤とし、広く材料の持つ不完全性を知識として体系化するとともに、格子欠陥・ナノ構造物の制御技術とその新機能性を探索し、創製することに挑戦しています。(図 4)

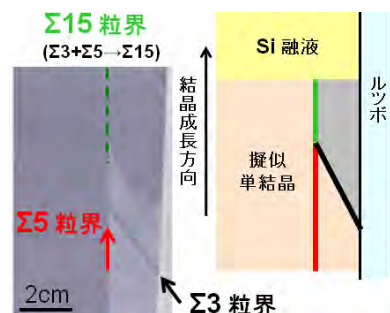


図 4. 粒界制御による高品質 Si 結晶の育成。日刊工業新聞に記事掲載。(2014 年 3 月 3, 10 日)

量子ナノ物性グループ

Quantum Nano Science (QNS) Group

齊藤 英治 教授 内田 健一 准教授 塩見 雄毅 助教 井口 亮 助教

邱 志勇 助教 新関 智彦 助教 <http://saitoh.imr.tohoku.ac.jp/>

我々の目標は、量子力学的現象・相対論的現象を自在に操り、従来の電子技術を超えた次の世代のテクノロジーの物理原理を創ることです。新しい時代の科学を自らの手で切り拓くため 研究に日々楽しく取り組んでおり、やる気のある皆さんが我々の仲間に加わることを楽しみにしています。

(1) スピントロニクス

スピントロニクスは、電子スピンの自由度を量子レベルで利用し、新しいデバイスの物理原理を創出する学問です。我々は現在、電流のスピンの版である「スピン流」の物理体系の構築に取り組んでいます。スピン流を用いた新しい原理により、古典情報・量子情報の超低損失での伝送や磁場を使わないスピンメモリの駆動が可能になり、これにより電磁気学やバンド理論を基礎にした従来のエレクトロニクスの概念を根底から拡張できると考えています。

我々は、相対論的量子効果を利用したスピン流の検出を皮切りに、超スピン伝導、スピンゼーベック効果など新しいスピン量子現象の発見を次々と成功させており、世界レベルで注目を集めています。



磁性体薄膜作製時のプラズマ発光



MR 試料の電子顕微鏡写真

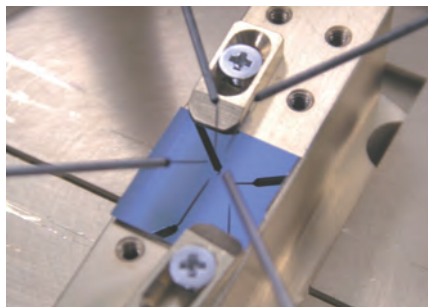
(2) ナノ構造電子・光物性

最新のナノテクノロジーに基づいてデザインされた強相関電子系（主にモット絶縁体）、超伝導体、磁性体微小構造の量子物性開拓及びその物理的枠組みの構築を行っています。極微細加工により物質中の電子スピンの空間構造や電子量子位相を操り、量子機能や光機能を引き出すことができます。多岐にわたる実験手法を駆使し、計算機実験や理論モデル計算を併用した全方位的アプローチを行っています。現在は、以下のテーマを設定しています。

- a) 強相関系ナノ構造の電子物性
- b) 超伝導体/磁性体ハイブリッド構造の物理
- c) ナノ構造磁性体における光物性

(3) 量子電子物性

電子間の強い相互作用や低次元性に伴う量子ゆらぎ、また波動関数のトポロジ的性質に関連した量子干渉効果と電子スピンの相干がもたらす新しい物性は、これからの物性物理学を支える重要な研究テーマの一つです。当研究室では、このような観点から新しい量子電子物性の開拓を目指し、高温超伝導体のスピンギャップ相や、量子スピン系におけるスピノン、トポロジカル絶縁体の表面状態などに関する研究を行っています。様々な薄膜作製技術や物性測定技術を用いて、試料作製から測定・解析まで自ら行い、これまでの物性物理学の範疇を超えた新しい量子現象を開拓しています。



低温マイクロプローバー中の MR 試料基板

結晶成長物理グループ

Crystal Growth Physics Group

藤原航三 教授 前田健作 助教

<http://www.xtalphys.imr.tohoku.ac.jp/>(連絡先: kozo@imr.tohoku.ac.jp)

結晶成長物理グループでは、液相または気相から固相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、酸化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、といった融液成長の本質はほとんど理解されていません。当グループでは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

本研究グループでは、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を行っていきます。以下に、当面の主要課題を挙げます。

- 半導体材料の固液界面ダイナミクス
- Si 多結晶の組織形成メカニズム
- 太陽電池用 Si 多結晶インゴットの成長技術開発
- 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

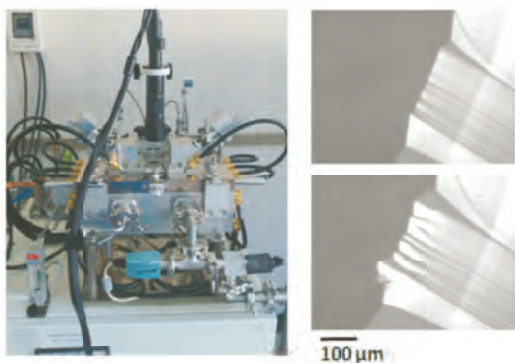
融液からバルク結晶が成長する際、固液界面における原子の挙動により、成長速度や結晶組織に違いが生じます。Si のような高融点 (1414

°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、融液から結晶が成長する様子を直接観察することが可能な“その場”観察装置を独自に開発し、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進展させていきます。

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、太陽電池の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。



その場観察装置と Si の固液界面



キャスト成長装置と太陽電池用 Si 多結晶インゴット

固体イオン物理グループ

Solid State Ion Physics Group

河村 純一 教授 桑田 直明 准教授 高橋 純一 助教

<http://www.tagen.tohoku.ac.jp/labo/kawamura/index.html>

e-mail: kawajun@tagen.tohoku.ac.jp

結晶やアモルファス固体中を水素・リチウム・銀などのイオンが高速で通り抜ける奇妙な現象を超イオン導電性と呼ぶ。この現象を利用して、環境ガスセンサーやリチウム二次電池等が開発されている。また、将来の水素エネルギー時代に向けて、水素燃料電池、水素・酸素製造装置などの研究も進んでいる。この研究分野は固体イオニクスと呼ばれ、21世紀の先端科学を担う重要な学問分野となりつつある。本研究室では、固体の中でイオンがどのように動くのかを、レーザー分光・核磁気共鳴などの物理的手段を用いて解明し、さらに薄膜電池や燃料電池などへの応用を目指した研究も進めている。

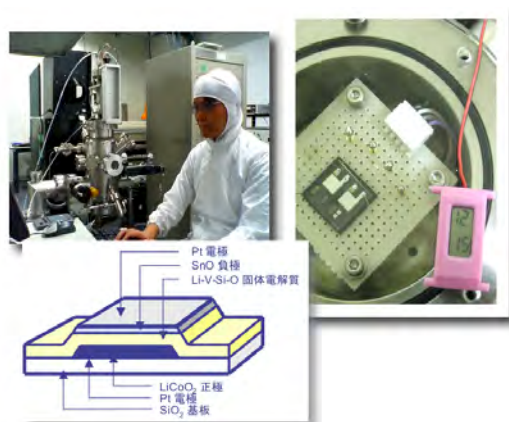
1) 全固体薄膜リチウムイオン二次電池の材料開発と物性：リチウム電池の安全性向上とマイクロデバイス用微小電源への応用を目指し、全固体薄膜リチウムイオン電池の材料開発と基礎物性研究を行っている。物質としては、 LiCoO_2 などのインターカレーション化合物や Li_3PO_4 などのリチウムイオン伝導体をパルスレーザー堆積法で薄膜化し、その電氣的・光学的物性および電池特性を研究している。

2) 超短パルス（フェムト秒）レーザーを用いたイオンダイナミクスの研究：超短パルス（フェムト秒）レーザーを用いた非線型分光計測法の開発研究と、それを用いた固体や液体中のイオンダイナミクスの物性研究を行っている。現在、超イオン導電体の β アルミナにおけるコヒーレント・フォノンとイオン拡散やイオン配置の不規則性との関係を調べている。

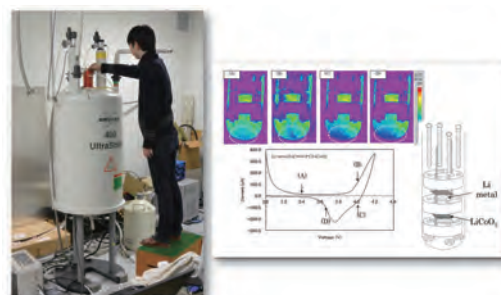
3) 核磁気共鳴法による固体内イオン移動の研究：原子核の持つ核スピンをラベルとして用い、固体内でのイオンの移動を核磁気共鳴 (NMR)

法により計測する。特に、NMR ホールバーニングや多次元 NMR を用いたイオン移動速度の決定や、強力なパルス磁場勾配を用いたマイクロイメージングと拡散係数測定法の開発を行っている。最近は、この方法でリチウムイオン電池のその場観察を行い、充放電中のリチウム拡散を研究している。

4) 過冷却液体・ガラス・ナノ複合体におけるイオン伝導機構の解明：液体の動的ゆらぎの凍結とガラスの不均一構造形成、そのイオンダイナミクスへの影響などを、交流電気伝導度、核磁気共鳴、光散乱などを用いて研究し、高イオン伝導体を得る指針を探っている。



薄膜リチウム電池の材料研究



リチウム電池の NMR イメージング実験

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 Johannes Reim 助教

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

email: taku@tagen.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静止しますが、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 - 1000meV) 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、スピンドYNAMICS測定に対する唯一無二の手段である中性子非弾性散乱を駆使して以下のような研究を行っています。

・ 遍歴電子系における反強磁性と超伝導の研究

・ 低次元フラストレート量子スピン系における巨視的量子現象の研究

・ 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

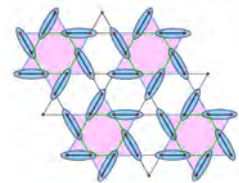
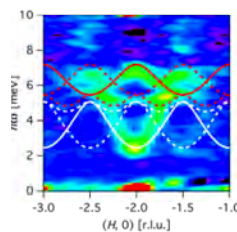
・ 中性子非弾性散乱分光器の開発

・ 中性子非弾性散乱スペクトル解析法の開発

本研究室の特色は、中性子散乱を用いた物質科学研究を行うだけでなく、中性子散乱法やその解析法の開発も行いう事にあります。世界中の中性子散乱施設を用いて研究を推進すると同時に、国内の中性子散乱分光器の装置グループ員としてそれらの開発を進めるといふ、極めて

やり甲斐の有る研究スタイルです。また、一人一人の学生がそれぞれが研究対象とする物理現象への理解を深めるため、試料作成から中性子データ解析までを一貫して行います。そのため、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、歪んだ $s=1/2$ 籠目格子反強磁性体 $\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ の磁気励起測定例を図に示します。この系は低温で非磁性の基底状態を持ちますが、非磁性基底状態波動関数の空間的な詳細は不明でした。我々は非磁性基底状態から磁性励起状態への遷移の波数依存性を詳細に調べる事で、非磁性基底状態がシングレットの風車型配列からなる Valence-Bond-Solid 状態である事を明らかにしました。この状態は極めて興味深い状態であり、歪みの無い理想系で予想される Resonating-Valence-Bond 状態の解明に大きなヒントを与えるものと期待されます。



上段左: $\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ 単結晶を用いて測定した中性子非弾性散乱スペクトル。米国 SNS の CNCS 中性子散乱分光器で測定。強い分散を持つシングレット-トリプレット励起が観測された。上段右: VBS シングレット配置。下段: 中性子散乱に使用する種々の単結晶試料。

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 助教

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

email: 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ター (1nm = 10^{-9} 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、

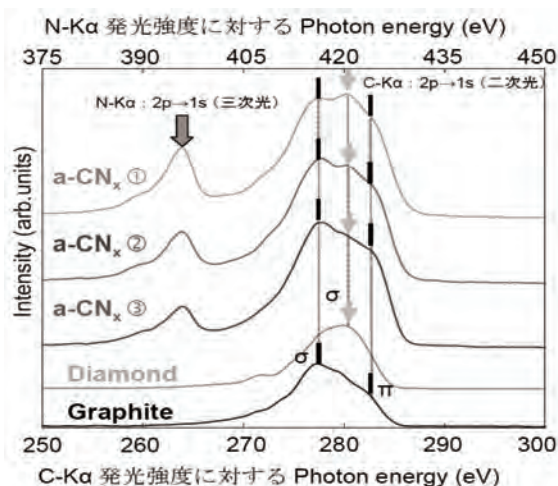
を行っています。これらの測定手法の精度向上のための装置・解析手法の開発と、その物性物理学への応用を行い、多くの成果を上げてきました。

現在、次のようなテーマについて研究を行っています。

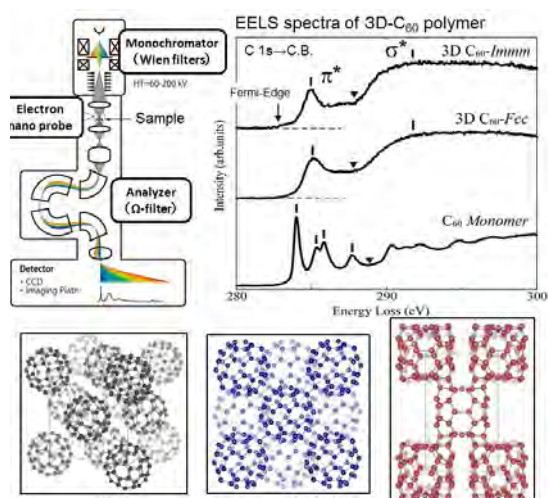
1. クラスタ物質やナノネットワーク物質 (ナノチューブ, フラレン, ボロン化合物など) の構造・電子状態
2. 近赤外光散乱ナノ微粒子の光学物性
3. 遷移金属化合物における擬ギャップと結

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-CNx 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

URL; <http://www.tagen.tohoku.ac.jp/modules/laboratory/index.php?laboid=89>

TEL; 022-217-5352

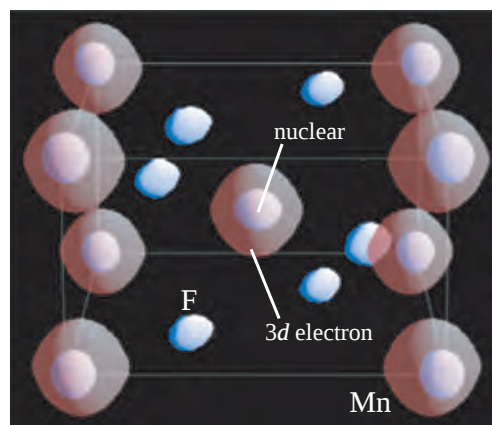
結晶は原子が規則的に並んだものですが、相転移（例えば黒鉛がダイヤモンドになる等）が起こると原子や電子の分布は何らかの事情で変化します。それがたとえ僅か $0.1 \text{ \AA}$ 以下の変化であっても結晶の性質（誘電性、伝導性、磁性など）が大きく変わることがしばしば起こります。このような原子や電子の変位を X 線や中性子線などを用いた回折実験で「観る」ことにより、結晶の世界の法則を明らかにしていきます。実験は高温から極低温、あるいは高磁場下・高圧下など様々な条件で行います。こういうといかにも日常とは全く無縁なことと思えるかもしれませんが、皆さんが日頃使うテレビ・パソコンなどの中のコンデンサ、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

山口 浩司 教授（客員） 佐々木 智 准教授（客員） 大谷 知行 准教授（客員）

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

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

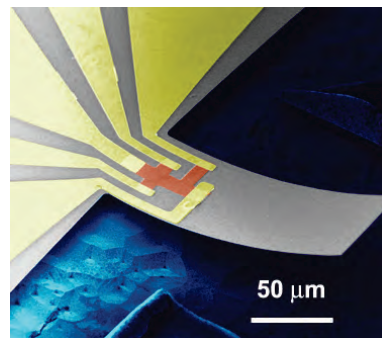
20 世紀前半、量子力学は自然界における微視的な現象を説明する新しい物理法則として生まれました。それから 100 年近くが経過した現在、実験技術は著しく進歩し、今や量子力学は単に自然現象を説明するという受身的な役割ではなく、電子や光子の振る舞いを極限まで制御し、量子的重ね合わせ状態を活用した量子コンピュータや量子センシングなどの革新的技術を生み出すキーコンセプトとして、極めて重要で能動的な役割を担うようになっています。量子計測グループでは、半導体や超伝導体などによる固体量子構造を用い、そこでの電子や光子の量子力学的な振る舞いを明らかにし、革新技術として活用する研究を進めています。

主要テーマのひとつは、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 1GHz 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。

もうひとつの主要な研究テーマは、低次元量子構造における電子輸送の研究です。ここでは GaAs や InAs などの半導体をベースに 1 次元ナノワイヤや 0 次元量子ドットを作製し、ミリケルビン領域に至る温度範囲で電気伝導特性の測定を行って新規物理現象の探索を進めています。結晶成長によってボトムアップ的に得られるひげ状物質である半導体ナノワイヤを用いて、高性能な電界効果トランジスタ（FET）を作成することにも取り組んでいます。これら 2 つの半導体低次元構造に関する研究は、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。

量子計測グループの 3 つめのテーマは、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 0.3-30THz、波長 1mm-10 μ m）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の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。



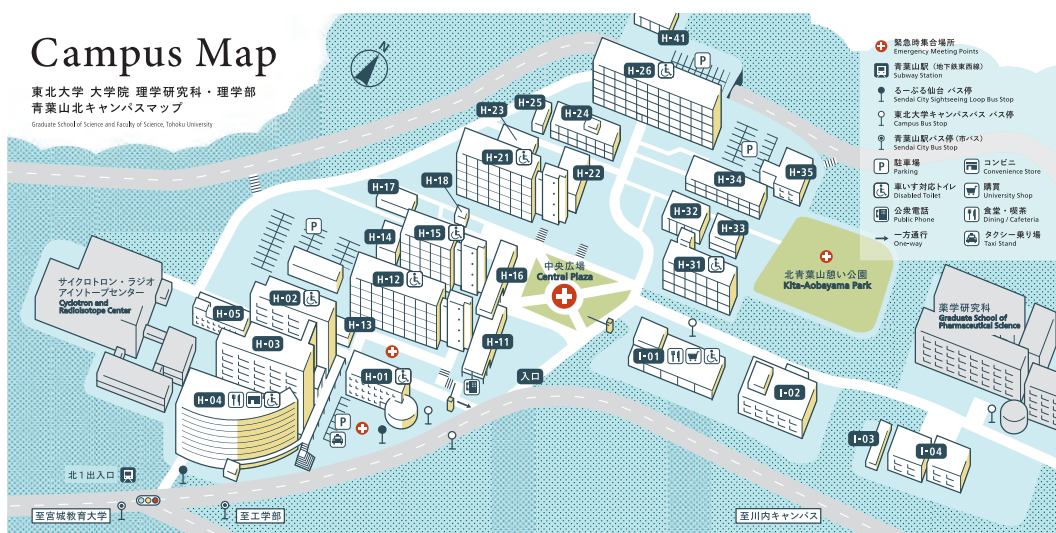
量子ホール素子を組み込んだフォノン共振器



理化学研究所で作製された超伝導ミリ波検出器

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

東北大学大学院理学研究科物理学専攻 案内

発行: 2016 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
ホームページ: <http://www.phys.tohoku.ac.jp/>
