

東北大学大学院理学研究科
物理学専攻 案内

Department of Physics
Graduate School of Science
Tohoku University

一月ハ普ク一切ノ水ニ現ジ
一切ノ水月ハ一月ニ撰ス

Neutrino Oscillation

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Open Questions

- Origin of the masses
- CP violations
- Flavor problems
- Grand unification and supersymmetry
- Cosmology
- and many more



© T. Moroi

2004 年 6 月

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。

表紙説明

ニュートリノ振動

ニュートリノは物質の最小単位である素粒子のひとつです。電子型・ミューオン型・タウオン型の3タイプがあります。ニュートリノは相互作用がとても弱い素粒子ですが、その性質は驚きに満ちています。2002年、東北大学のKamLAND実験グループは原子炉で作られたニュートリノを用いて、ニュートリノが時間と共にタイプを変化することを精密に観測しました。

「ニュートリノ振動」と呼ばれるこの現象は、素粒子標準模型を超える素粒子模型の存在を示唆する重大な発見です。ニュートリノ物理学は物質質量の起源、CP（電荷・パリティ対称性）の破れやフレーバーの物理、大統一理論や超対称性、はては宇宙の歴史など、未だ理解されていない様々な素粒子物理学の問題と深い関連があると考えられています。

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若い人たちのために、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官ばかりでなく、東北大学の研究施設や研究所に所属する多数の教官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、大学院生も指導教官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、層の厚い教官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、東北大学物理学専攻は、国が重点的にサポートする21世紀COEプログラムの拠点のひとつに採択されています。また、国際的な調査組織ISIによる研究機関ランキングで、本専攻は物理学分野で、国内2位、世界16位の評価(2003年度)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ホームページから、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

東北大学大学院理学研究科物理学専攻は戦後の学制改革にともない、1953年にスタートした。しかし、物理学科の歴史は1912年に東北帝国大学の分科大学（理科大学）が設置されたときまで遡る。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、教育と研究に心血を注ぎ、そこに研究第一主義の伝統が生まれた。その後物理学科は順調に発展してきたが、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した。戦後は新製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た。大学院の物理専攻の設置後の充実はめざましく、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った。

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し、平成6年度から大学院理学研究科物理学専攻として重点化され、従来の物理学専攻、原子核理学専攻、物理学第二専攻を統合して一本化された。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）からなる。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）、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）の6協力講座が参加した。さらに連携大学院が新設された。本物理学専攻の教官数は、基幹・協力講座、連携大学院合わせて約160名であり、全国でも最大規模の物理学教育研究組織である。

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)では91名、博士課程後期3年の課程(博士)では46名である。博士課程前期2年の課程への入学は例年原則として8月末(筆記試験:平成16年8月30/31日、面接試験:9月1日)に行われる選考試験を経て許可される。選考は、筆記試験、面接試問などを総合して行う。例年、6月に募集要項が出される。平成16年の出願期間は7月26日から8月6日の2週間である。詳しくは、東北大学理学部・理学研究科教務掛(〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉、電話:022-217-6350、6351、電子メール:sci-kyom@bureau.tohoku.ac.jp)に問い合わせること。

博士課程後期3年の課程への進学は、修士論文の発表と最終試験の結果を総合して行う。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、学内からの進学に準じた選考試験を経なければならない。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官に問い合わせをすること。

就職状況

本専攻では博士課程前期2年の課程(修士)修了後就職する学生は約半数であり、他学生は博士課程後期3年の課程に進学する。

本専攻の博士課程前期2年の課程(修士)の修了生の就職先は、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る。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、多岐にわたっているが、自らの研究経験を活かして活躍している人が多い。

博士課程後期3年の課程(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いる。

物理学専攻研究グループ一覧

注) 平成 18 年 3 月末までに定年となる教官 (* 印) は、平成 17 年度入学者の指導教官にはなれない。

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教 官	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 理 論 Particle Theory Group	えざわ じゅんいち 江澤 潤一 教 授	12,13
			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	
			たなばし まさはる 棚橋 誠治 助教授	
			もろい たけお 諸井 健夫 助教授	
			わたむら さとし 綿村 哲 助教授	
			いしかわ ひろし 石川 洋 助 手	
			すみの ゆきなり 隅野 行成 助 手	
			ほった まさひろ 堀田 昌寛 助 手	
		やまだ よういち 山田 洋一 助 手		
		原 子 核 理 論 Nuclear Theory Group	たきがわ のぼる 滝川 昇 教 授	14
			はぎの こういち 萩野 浩一 助教授	
			まるやま まさひろ 丸山 政弘 助 手	
			おの あきら 小野 章 助 手	

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教 官	掲載頁
物性理論 Condensed Matter Theory	固体統計物理学講座 Theoretical Condensed Matter Physics	物性理論 (理学部) Condensed Matter Theory Group	かわかつとしひろ 川勝 年洋 教授 くらもと よしお 倉本 義夫 教授 さいとう りいちろう 齋藤 理一郎 教授 にいげき こまじろう 新関 駒二郎 教授* いしはら すみお 石原 純夫 助教授 さかい とおる 坂井 徹 助教授 はやかわ よしのり 早川 美徳 助教授 いずみだ わたる 泉田 渉 助手 うちだ なりや 内田 就也 助手 くすのせ ひろあき 楠瀬 博明 助手 なかじま たつや 中島 龍也 助手 ほんどう つよし 本堂 毅 助手 まつもと むねひさ 松本 宗久 助手 よこやま ひさとし 横山 寿敏 助手	15,16
	金属物理学講座 Metal Physics (協力講座 II: 金属材料研究所) (Institute for Materials Research)	量子物性理論 (金 研) Quantum Condensed Matter Theory Group	まえかわ さだみち 前川 禎通 教授 とおやま たかみ 遠山 貴巳 助教授 こやま とみお 小山 富男 助手 たかはし さぶろう 高橋 三郎 助手 こし ば え わたる 小椎八重 航 助手	17
		量子輸送理論 (金 研) Quantum Transport Theory Group	ふくやま ひでとし 福山 秀敏 教授	18

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教 官	掲載頁
素・核実験 Experimental Nuclear and Particle Physics	素粒子・核物理学講座 Experimental Nuclear and Particle Physics 高エネルギー物理学講座 High Energy Physics (協力講座 I : ニュートリノ科学研究センター) (Research Center for Neutrino Science)	素 粒 子 実 験 Experimental Particle Physics Group	すずき あつと 鈴木 厚人 教授 やまくち あきら 山口 晃 教授 やまもと ひとし 山本 均 教授 しろい じゅんぺい 白井 淳平 助教授 すえかね ふみひこ 末包 文彦 助教授 いのうえ くにお 井上 邦雄 助教授 はやしの ともき 林野 友紀 助教授 ながみね ただし 長嶺 忠 助手 はせがわ たくや 長谷川 琢哉 助手 こが まさゆき 古賀 真之 助手	19,20
		原 子 核 物 理 Experimental Nuclear Physics Group	はしもと おさむ 橋本 治 教授 こばやし としお 小林 俊雄 教授 たむら ひろかず 田村 裕和 助教授 いわさ なおひと 岩佐 直仁 助教授 なかむら さとし 中村 哲 助教授 ふじい ゆう 藤井 優 助手 おおつ ひであき 大津 秀暁 助手	21,22
		中間エネルギー 核物理 Intermediate Energy Nuclear Physics Group	みやせ はるひさ 宮瀬 晴久 教授 まえだ かずしげ 前田 和茂 助教授 かねだ ひろき 神田 浩樹 助手	23,24

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教 官	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 I: 原子核理学研究施設) (Laboratory of Nuclear Science)	原子核理学 Nuclear Science Group	かきぎ じろうた 笠木 治郎太 教授 しみず はじめ 清水 肇 教授 はま ひろゆき 浜 広幸 教授 たまえ ただあき 玉江 忠明 助教授 おおつき つとむ 大槻 勤 助教授 かわい まさゆき 河合 正之 助教授 やまざき ひろひと 山崎 寛仁 助手 ひので ふじお 日出 富士雄 助手 しんどう かつひろ 神藤 勝啓 助手 ゆうき ひでゆき 結城 秀行 助手	25,26
	核放射線物理学講座 Nuclear Radiation Physics (協力講座 II:サイクロトロン・ ラジオアイソトープセンター) (Cyclotron and Radioisotope Center)	核放射線物理 Nuclear Radiation Physics Group	おかむら ひろゆき 岡村 弘之 教授 しのづか つとむ 篠塚 勉 助教授 てらかわ あつき 寺川 貴樹 助手 ふじた まさひろ 藤田 正広 助手	27
	加速器科学講座 Accelerator Science (連携大学院: 日本原子力研究所) (Japan Atomic Energy Research Institute) (連携併任分野: 高エネルギー加速器機構) (High Energy Accelerator Research Organization)	加速器科学 Accelerator Science Group	よこみぞ ひであき 横溝 英明 教授 (客員) ながみや しょうじ 永宮 正治 教授 (併任) さきき おさむ 佐々木 修 助教授 (併任)	28

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教 官	掲載頁
物性実験 I Condensed Matter Experiment I	電子物理学講座 Condensed Matter Physics –Electronic Properties– 関連物理学講座 Strongly Interacting Many Particle Quantum Systems (協力講座 II: 極低温科学センター・ 極低温物理学部) (Very Low Temperature Physics Division – Center for Low Temperature Science)	ミクロ物性物理 Microscopic Research on Magnetism Group	おの 小野寺 秀也 教授 たかぎ 高木 滋 助教授 とうぼう 東方 綾 助手	29
		物質構造物理 Materials Structure Physics Group	むらかみ 村上 洋一 教授 いわさ 岩佐 和晃 助教授 まつむら 松村 武 助手 なかお 中尾 ひろのり 助手	30
		低次元量子物理 Low-Dimensional Quantum Physics Group	とよた 豊田 直樹 教授 まつい 松井 ひろし 助教授	31
		光電子固体物性 Photoemission Solid-State Physics Group	たかはし 高橋 たかし 隆 教授 きとう 佐藤 たかふみ 宇史 助手	32
		ナノネットワーク固体物性 Solid-State Physics on Nano-Network Solids Group	たにがき 谷垣 かつみ 勝己 教授	33
		極低温科学センター・ 極低温量子物理 Very Low Temperature Physics Group – Center for Low Temperature Science	あおき 青木 はるよし 晴善 教授 おちあい 落合 あきら 明 助教授 きむら 木村 のりあき 憲彰 助手	34

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教 官	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 II: 金属材料研究所) (Institute for Materials Research) (協力講座 II: 極低温科学センター・低温科学部) (Low Temperature Science Division – Center for Low Temperature Science)	超伝導物理 Superconductivity Physics Group	こばやし のりお 小林 典男 教授 さ さ き たかひこ 佐々木 孝彦 助教授 にしぎき てるかず 西寄 照和 助手 よねやま なおき 米山 直樹 助手 くどう かずたか 工藤 一貴 助手	35
		金属磁性 Metallic Magnetism Group	やまだ かずよし 山田 和芳 教授 おおやま けんじ 大山 研司 助教授 ひらか はるひろ 平賀 晴弘 助手 ふじた まさき 藤田 全基 助手	36
		ナノ材料物理 Nanostructured Materials Physics Group	いわさ よしひろ 岩佐 義宏 教授 たくち やすじろう 田口 康二郎 助教授 たけのぶ たいし 竹延 大志 助手 こばやし しんいちろう 小林 慎一郎 助手	37
		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 助手	38
		極低温科学センター・低温物質科学 Low Temperature Material Science Group – Center for Low Temperature Science	のじま つとむ 野島 勉 助教授 なかむら しんたろう 中村 慎太郎 助手	39
		アクチノイド物理学講座 Physics of Actinide Group (連携大学院: 日本原子力研究所) (Japan Atomic Energy Research Institute)	アクチノイド物理 Actinide Physics Group	みずき じゅんいちろう 水木 純一郎 教授 (客員) めとき なおと 目時 直人 助教授 (客員) むらまつ やすし 村松 康司 助教授 (客員)

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教 官	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 Biophysics	放射光・光電子物理 Synchrotron Radiation and Photoelectron Physics Group	すずき しょうじ 鈴木 章二 助教授	41
		表面物理 Surface Physics Group	すとう しょうぞう 須藤 彰三 教授 さかもと かずゆき 坂本 一之 助手	42
		レーザー分光物理 Laser Spectroscopy Group	さいかん せいしろう 齋官 清四郎 教授 よしざわ まさゆき 吉澤 雅幸 助教授 これえだ あきとし 是枝 聡肇 助手	43
		生物物理 Biophysics Group	おおき かずお 大木 和夫 教授 みやた ひでたけ 宮田 英威 助教授 おおば てつひこ 大場 哲彦 助手	44
	光物性物理 Solid State Photophysics Group	いしはら てるや 石原 照也 教授 いわい しんいちろう 岩井 伸一郎 助教授 いわなが まさのぶ 岩長 祐伸 助手	45	
	結晶物理学講座 Crystal Physics (協力講座 II : 金属材料研究所) (Institute for Materials Research)	格子欠陥・ナノ構造物性 Lattice Defect Physics Group	よねなが いちろう 米永 一郎 助教授	46

面接グループ	大講座・協力講座	研究グループ	教 官	掲載頁
物性実験 II Condensed Matter Experiment II	結晶物理学講座 Crystal Physics (協力講座 II: 金属材料研究所) (Institute for Materials Research)	結晶成長物理 Crystal Growth Physics Group	なかしま かずお 中嶋 一雄 教授 うさみ のりたか 宇佐美 徳隆 助教授 さざき げん 佐崎 元 講師 ふじわら こうぞう 藤原 航三 助手	47
		量子表面界面科学 Surface/interface Science Group	さくらい としお 櫻井 利夫 教授 ながお ただあき 長尾 忠昭 助教授 ふじかわ やすのり 藤川 安仁 助手 J. Sadowski サドヴスキー 助手 たかむら やまだ 高村(山田) 助手 ゆきこ 由起子 助手	48
	分光物理学講座 Solid State Spectroscopy (協力講座 II: 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 しばた ゆきお 柴田 行男 助教授 かみしま おさむ 神嶋 修 助手	49
		強相関固体物性 Correlated-electron Solid State Physics Group	ありま たかひさ 有馬 孝尚 教授 いし きみひろ 伊師 君弘 助手	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 つだ けんじ 津田 健治 助教授	51
		結晶構造物性 Structural Physics and Crystal Physics Group	のだ ゆきお 野田 幸男 教授 わたなべ まさし 渡邊 真史 助手 きむら ひろゆき 木村 宏之 助手	52
	レーザー量子光学講座 Laser Quantum Optics (連携大学院:理研・ フォトダイナミックセンター) (The Institute of Physical and Chemical Research)	レーザー量子光学 Laser Quantum Optics Group	せがわ ゆうざぶろう 瀬川 勇三郎 教授* (客員) ちよう ほへい 張 保平 助教授 (客員) かわせ こうどう 川瀬 晃道 助教授 (客員)	53

素粒子理論グループ

Particle Theory Group

江澤潤一 教授 日笠健一 教授 山口昌弘 教授

棚橋誠治 助教授 諸井健夫 助教授 綿村哲 助教授

石川洋 助手 隅野行成 助手 堀田昌寛 助手 山田洋一 助手

<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。

量子力学と相対論は素粒子物理の基礎となっている。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。

素粒子の理論の基礎となるのは相対論的な量子場の理論で、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4つの基本的相互作用 - 電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用、重力相互作用 - のうち最初の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、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。

しかし、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。これを引き起こす相互作用は未知であり、その鍵を握るとされるヒッグス粒子も未発見である。標準模型の未解決な問題を解決する可能性として超対称理論と呼ばれる理論が注目を集めているが、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新粒子の存在を示す証拠は見つかっていない。また別の可能性として、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越えた物理が現れることが期待される。

これらの未知の粒子、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、精密測定両方向での実験が計画されている。一部の実験は既に始まっており、今後十年間には新しい

知見をもたらすことが期待できる。一方、陽子崩壊やニュートリノの質量・混合の探索も大統一理論と関連する重要なテーマであり、神岡をはじめとする非加速器実験が成果をもたらしつつある。

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。また、加速器実験で検証できない領域の物理も宇宙進化に寄与し、その効果は背景放射や暗黒物質などの観測に影響を与えうる。

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論という美しい理論が存在する。しかし、量子力学的な重力の理論は未完成である。また、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蒸発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なっている。量子重力理論の有力な候補として超弦理論がある。超弦理論は超対称性を重力まで拡張した超重力理論の有力な候補でもあるが、数学的複雑さのため解析が難しい。最近再び興味ある発展がなされており、それに関連して、ブレーン時空、非可換幾何などの新奇な可能性が追求されているが、いまだに多くの未解決の問題を含んでいる。

素粒子理論の基礎である場の理論はそれ自身数学的に興味深い性質を持っており、またその応用範囲も広い。現代数学の概念は素粒子物理に次々に適用されており、また逆に物理のアイデアが数学の発展をもたらす状況も生じている。これらの概念や手法は物性や生物物理にも応用が見出されている。特に、量子場の理論は凝縮系物理学の解析においても極めて有効であり、これを用いて新しい発見がなされている。

当研究室ではこれら素粒子理論の多くのテーマにわたって広範囲の研究を行っている。メンバーの最近の研究テーマを紹介しよう。

石川は、短い距離スケールでの時空概念の拡張をめざして、弦理論およびそのソリトンであ

る D-brane の理論を研究している。

隅野はリニアコライダーにおけるトップクォークの相互作用の研究やクォーコンニウムの性質を、摂動 QCD にもとづく束縛状態の理論で第一原理から導くなどの研究をしている。

堀田は主に曲がった空間での場の理論、特にブラックホールのエントロピ - 問題を研究している。また膨張宇宙における場の量子的なゆらぎや粒子生成なども研究対象としている。

山田は超対称性理論や大統一理論など、標準模型を越える物理の現象論を研究している。特に量子補正効果の理論的性質および実験に与える影響に関心を持っている。

棚橋はフレ - バ - 物理や強結合ヒッグス粒子の現象論などに興味を持ち、これらに対して対称性の自発的破れの動力学やその低エネルギー有効理論の観点から研究を進めている。

諸井は、素粒子の現象論や素粒子論の宇宙物理への応用について、特に超対称模型を視野に

入れながら研究している。

綿村は古典重力理論のリーマン空間は必ずしも量子論には適当ではないという立場から、非可換幾何学で記述される「空間」上で量子論や場の理論を構築しその性質を調べている。

江澤は非摂動的場の理論を現象的応用も含め研究している。現在は、非可換幾何学、位相的場の理論、低次元空間物理 (特に量子ホール効果) に関心を持ち、素粒子物理と凝縮系物理の境界領域の研究を行なっている。

日笠は素粒子現象に関心を持ち、ヒッグス粒子、超対称粒子、T e V 領域の強い相互作用を、高エネルギー将来計画を視野に入れつつ研究し、また素粒子における対称性の役割をテーマとしている。

山口は超対称統一模型の構成、超対称性の破れの機構、超弦理論とその有効理論などの研究を進めている。また、暗黒物質の問題や、インフレーション理論等にも興味を持っている。

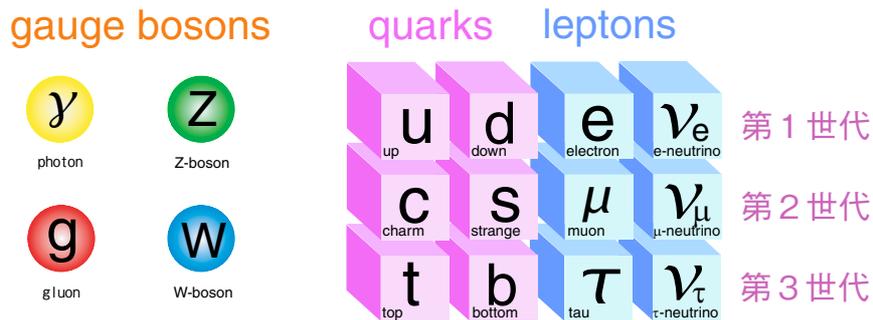


図1 クォークとレプトンの世代構造

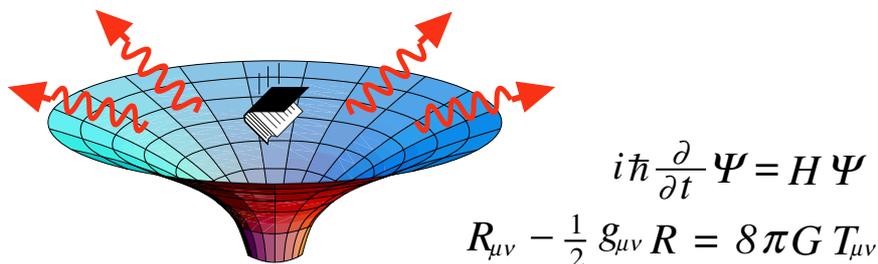


図2 ブラックホール蒸発と情報の損失

原子核理論グループ

Nuclear Theory Group

滝川 昇 教授 萩野 浩一 助教授 丸山 政弘 助手 小野 章 助手

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

原子核は、陽子や中性子などの核子が「強い相互作用」である核力により結合してできているフェルミオンの多体系である。核子は中間子と同様に「強い相互作用」をする粒子、すなわちハドロンとよばれている。本グループは、ハドロンが粒子の集団をつくることにより初めて現れる複雑な運動や状態、あるいはその動的な時間変化に関する研究を進めている。その幾つかを紹介しよう。

図1は、陽子数と中性子数をそれぞれ縦軸と横軸にとった平面上に原子核を並べた核図表と呼ばれる図である。対角線に沿った黒い印は、安定な原子核 256 種にウラン 238 など宇宙の年齢に匹敵する長寿命の同位体 12 種を加えたものである。その周りの黄色い印は、これまでに存在が確認された約 3000 種の短寿命原子核を表す。理論的には、更に 4,000 種の短寿命原子核が存在すると予測されている。この図は、近年急速に発展しつつある 2 次ビームの実験によって原子核物理学の研究対象が飛躍的に増大しつつあることを端的に示している。本グループでは、多体系物理の基礎理論の一つである平均場理論に基づいて、これらの原子核の構造や、原子核の存在限界に関する研究を進めている。核子に対する対相関や連続状態を考慮した応答関数の研究なども、本グループで行われている世界に誇る核構造研究である。

図2は、2つの重い原子核を衝突させたときに起こる典型的な現象を、3つのエネルギー領域に対してイメージ化したものである。左側の図は、衝突のエネルギーが低いときは核融合反応や弾性散乱、非弾性散乱が起こることを示している。衝突核間のクーロン斥力によるポテンシャル障壁より衝突のエネルギーが低くなると、核融合反応は量子力学系に特有のトンネル効果で起こり、その確率は衝突する原子核の形や励起運動に敏感に依存する。重イオン核融合

反応は、その意味で、多自由度系における量子トンネル効果の典型的な例である。本グループは、核融合反応の研究を初めとして、半古典論による弾性散乱の解析、摩擦と揺らぎの現象など低エネルギー重イオン反応の研究において、多くの国際的に著名な論文を発表している。その他、元素生成の謎解きに必要となる超低エネルギー核反応、超重元素の構造と生成反応、不安定核の反応などについても、新しい理論を開発しつつ独創的な研究を展開している。

ある程度エネルギーが高い原子核衝突では高温高密度状態ができる。そのような原子核の特性(状態方程式)を探ることは、原子核物理の重要課題であると同時に、中性子星や超新星爆発などの研究にも必要である。また、高密度状態は膨張して、真ん中の図のように、やがて多数のクラスターが生成する。この現象は原子核における液相気相相転移と密接に関連している。最近では、中性子過剰な系での状態方程式や相転移現象も注目されている。本グループでは、核反応の時間発展を微視的に計算するための独自の理論を用いて最先端の研究を進め、世界的にも高い評価を得ている。

非常に高いエネルギーで2つの原子核が衝突すると、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(図2の右側の図)。しかし、実験で実際に観測されるのはクォークが閉じ込められたハドロンの状態であり、QGPの確証を掴むのは容易ではない。今世紀に入って、その間接的な証拠を与える実験データも出始めた。この問題に関連し、本グループでは、相対論的な場の量子論を用いて、ハドロンの質量の起源を明らかにすることを目指し、熱平衡化や真空の相転移の時空発展の研究に取り組んでいる。

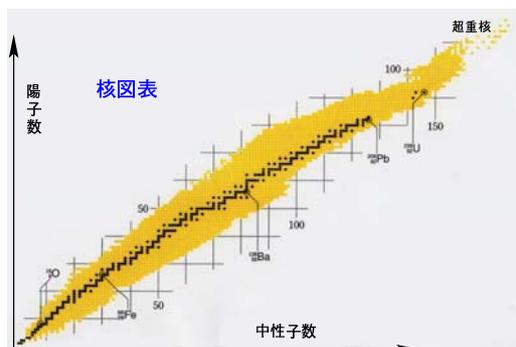


図1 これまでに存在が確認された原子核

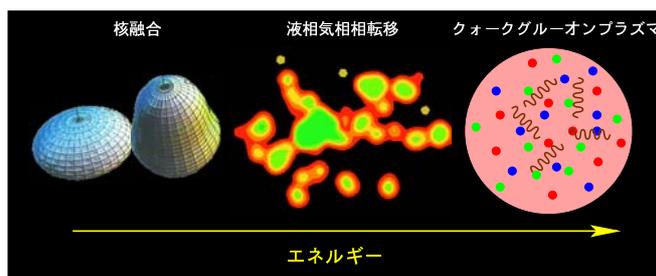


図2 衝突エネルギーによる核反応の変化

物性理論 (理学部) グループ

Condensed Matter Theory Group

川勝 年洋 教授 倉本 義夫 教授 齋藤 理一郎 教授 新関 駿二郎 教授

石原 純夫 助教授 坂井 徹 助教授 早川 美德 助教授

泉田 渉 助手 内田 就也 助手 楠瀬 博明 助手 中島 龍也 助手

本堂 毅 助手 松本 宗久 助手 横山 寿敏 助手

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

物性理論グループは、様々な物質の興味深い性質を理論的に解明する研究を行っている。以下に我々の研究室のめざすものと研究環境について紹介する。

物性理論の目的：

固体や液体は原子や分子が相互作用によって凝縮した系である。物性理論の目的は個々の凝縮系の興味ある性質を研究し、普遍的な物理的性質(物性)を深く理解することにある。具体的な目標として、(1) 未解決の現象を解明、(2) 物性の予言と新機能物質の設計、(3) 厳密解などによる数理的普遍性の探求がある。

物性理論の対象：

対象となる凝縮系とは、物質を構成する原子や分子、さらに電子やスピンの 10^{23} 個程度集まった系である。凝縮系の例として、固体や液体、また強相関電子系や量子スピン系がある。また凝縮系の特異な現象として、例えば超伝導や量子ホール効果がある。物性理論の醍醐味は、凝縮系の秩序状態や集団運動を、あらたな物理量を定義することで明快に記述することである。このような記述が可能なのは、粒子間の相互作用が階層的な大きさで存在することによる。

対象となる物質は、結晶、準結晶、非晶質と「結合形態」で分類でき、またナノ構造やソフトマテリアルでのメソスケール構造など「次元性と形」で分類することが可能である。近年分類される物質の範疇は大幅に拡大している。とくに計算機の進歩とともに、従来物理で考えられなかった、他の科学との「境界領域」が物性理論の対象となった。複雑系、非平衡、非線形、非局所相互作用、生体系がこの例である。物理的な手法を新領域に応用する意義は大きい。

このように、物性理論の対象は実に多岐にわたる。本グループには、アクティブに研究を展開する若い教官が多く、研究の手法と対象の多

くをカバーする。さらに異なる手法をもつ研究者間の交流が、新しい対象と手法を生む。

物性理論の方法：

電子や原子核などのミクロな構成要素の運動を規定する量子力学と、これらの粒子の集団的挙動に関する法則を与える統計力学を2本の柱として用いる(次のページ図参照)。解析的な研究手法の他に、計算機と計算手法の飛躍的進歩により、第一原理計算や経路積分の方法などを用いる研究方法が発展した。量子力学と統計力学の問題を直接数値計算で解明する計算物理学的手法も本グループでは活発に行われている。

研究環境：

大学院での教育・研究は、物性理論研究室の教官と院生との個別的な指導と協力により行われている。個々の問題に深く取り組むとともに、複数の教官で小グループを組織し、セミナーを行う。また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、また懇親会など、幅広い交流がある。この結果、基礎的な物理をいろいろな視点から学ぶことができる。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官でない教官とも自由に議論がおこなわれている。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る。

粒子間の多くの相互作用が階層的に存在することによって興味深い物性が発生するように、多彩で柔軟な教育環境(指導教官、小グループ、物性理論全体)は、特筆すべき効果が期待できる。本グループの研究・教育環境は物理学専攻内でも特徴的といえる。さらに、外国人のビジターなどを通じて語学力の向上や異文化の理解、さらに国際的な視点を学ぶことが可能である。

本グループは、物性理論研究グループとしては質・量ともに国内外で最大級である。大学院生には、この利点を最大限に生かしてもらいた

い。個々の教官の研究テーマを以下に掲げる。これから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も広く学ぶことを希望したい。

各教官の現在のテーマ

各教官の主なテーマ(キーワードのみ)を以下に示す。詳細に関しては各教官に問い合わせたり、Web ページを参照されたい。

石原：強相関電子系の電子状態。特に遷移金属化合物におけるスピン・電荷・軌道量子複合流体、巨大磁気・電気・光学応答、電子相関と電子-格子相互作用。

泉田：ナノスケール物質群における量子効果。量子ドットやカーボンナノチューブなどの伝導現象、電子相関の効果、ナノ電気力学系としての物性。

内田：液晶やゲルなどのソフトマテリアル、特に複合系のパターン形成、相転移ダイナミクスや粘弾性。

川勝：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。

楠瀬：希土類化合物・遷移金属における、電子相関・軌道縮退を背景とした磁性と超伝導。

倉本：相互作用の強い量子多体系。具体的には、軌道縮退のある電子系の磁性と超伝導、低次元系の厳密解、分数統計、超対称性など。

齋藤：固体物理、半導体物性。特にカーボンナノチューブの電子状態、フラレーン、共鳴ラマン分光、計算物理、電子格子相互作用、ナノ構造、量子効果、伝導現象。

坂井：量子スピン系や高温超伝導体を中心とする強相関電子系の統計力学。最近では磁場中で起きる現象(磁化の量子化、マグノンのボーズ凝縮等)。

中島：低次元電子系及び二次元ボーズ系の理論。特に、量子ホール効果とボーズ・アインシュタイン凝縮。

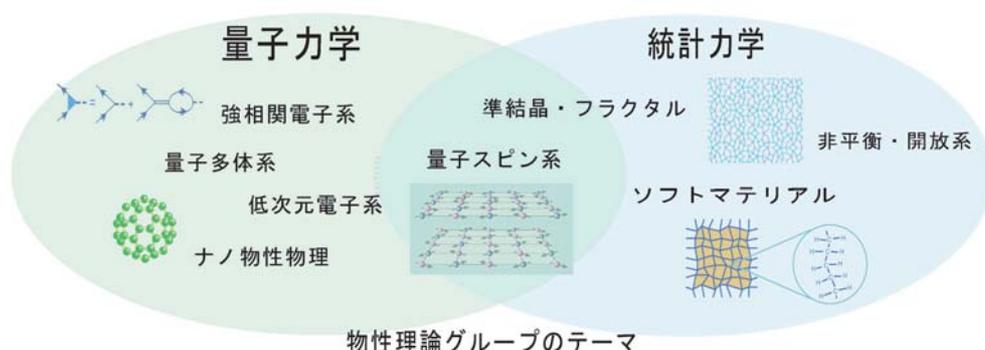
新関：準結晶を含む決定論的非周期系の構造と電子状態。線り込み群、フラクタル幾何学、計算機シミュレーション。

早川：非平衡・開放系の統計物理と非線形動力学。特に、非可逆な成長過程の統計理論、ニューラルネットワークの学習理論、粉粒体や流体系のシミュレーション。

本堂：非線形動力学、非平衡熱・統計力学。系の多重安定性やゆらぎの動的時間相関によって特徴づけられる系の理論、熱エネルギー変換論。

松本：擬一次元量子スピン系の量子相転移の量子モンテカルロシミュレーションおよび新しい計算手法の開発、特に量子ゆらぎと次元性の効果。

横山：強い電子間相互作用が物性を支配する系の理論的研究。高温超伝導体、遷移金属化合物、低次元電子系。



量子物性理論(金研)グループ

Quantum Condensed Matter Theory Group

前川 禎通 教授 遠山 貴巳 助教授

小山 富男 助手 高橋 三郎 助手 小椎八重 航 助手

<http://www.maekawa-lab.imr.tohoku.ac.jp/>

銅酸化物高温超伝導体の発見を契機に、物質に対する新しい理論の構築が急務とされるようになった。銅酸化物を含めて多くの遷移金属酸化物では、その金属状態および超伝導状態を磁氣的絶縁体状態と同時に把握する必要が認識されるようになってきたことによる。それは従来の金属電子論とは違った物質に対する理論であり、強相関電子論と呼ばれる。従来の電子論はバンド理論とも呼ばれ結晶中での個々の電子を基本に置くものである。この理論は量子力学とほぼ同じ歴史を持つ。一方、強相関電子論は電子集団の理論であり、多体問題である。この新しい理論は、電子から一歩進んで電子の内部自由度である、スピン・電荷・軌道から出発するものであり、銅酸化物の高温超伝導やいくつかの磁性体で見られる巨大磁気抵抗の解明には不可欠であると言える。

当理論グループでは、以下の三つの研究テーマを通して、新しい多体電子論の構築を行っている。

1. 高温超伝導体の超伝導発現機構と電子励起現象

銅酸化物高温超伝導体の親物質は二次元反強磁性絶縁体であり、これに電荷をドーピングすることにより、高温超伝導が出現する。我々は二次元磁性体でのスピンと電荷の関係を明らかにすることにより、高温超伝導体の電子状態を記述する方程式の建設と高温超伝導体の物質設計を目指している。また、一次元銅酸化物では、電子のスピンと電荷への分離により、非常に強い非線形光学効果を示す。この分離と電子励起の関係の解明も重要テーマである。

2. 金属・絶縁体転移とそれに伴う異常物性

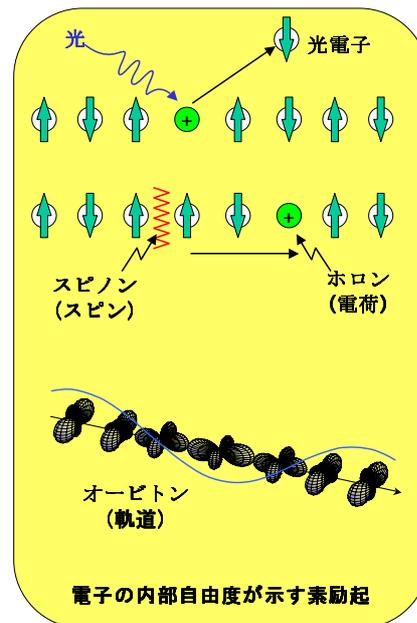
多くの遷移金属酸化物では磁場や温度により金属・絶縁体転移を示す。この転移は、遷移金属イオン中の電子の内部自由度であるスピンと電荷および軌道が相互作用することによ

り起こる現象である。ここで軌道とは電子の波動関数の空間的広がりの対称性である。我々は、このような電子の軌道の量子力学的性質の解明を目指している。

3. ナノスケール磁性体と超伝導体の磁性と伝導の相関現象

強磁性体間の電子のトンネル効果は、電子のスピンに強く依存している。さらに、いわゆるナノスケール系では、トンネル効果に伴う電荷の揺らぎがトンネル効果そのものに影響を与える。このように、強磁性体や超伝導体のナノスケール系のトンネル効果は、電子の内部自由度であるスピンと電荷の相関に多くの知見を与える。我々は、このようなトンネル系に現われるスピンと電荷の結合/分離の理論の構築を行なっている。

当理論グループでは、実験的研究グループと協力しながら、新しい物性理論体系の構築と物質の示す量子現象の開発および解明を目指している。



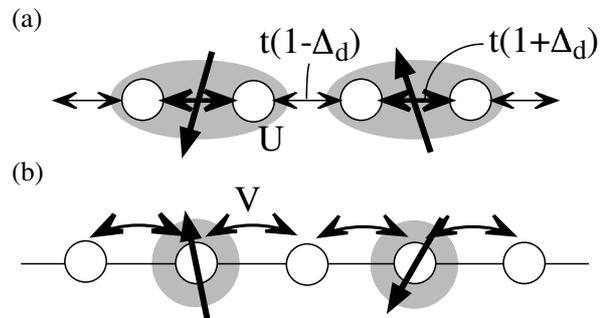
量子輸送理論 (金研) グループ

Quantum Transport Theory Group

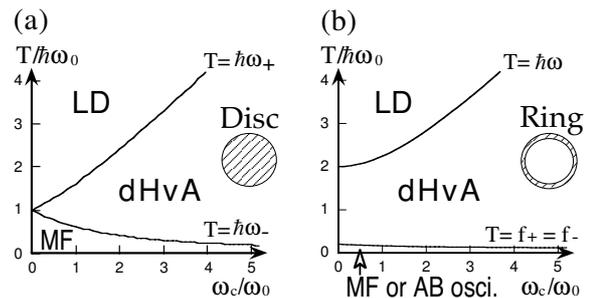
福山 秀敏 教授

固体が持つ性質は実に多様であるが、その多様性の背後にある系統性は量子力学に基礎を置く固体物性理論によって見事に統一的に理解されてきている。確固たる基礎を持つ物性論はこれからも化学・バイオとの境界領域へと研究対象をますます広げ、物質科学研究の発展に中核的な役割を果たすことが期待される。固体において量子効果が極めて象徴的に現れるのが、多体系での低エネルギー輸送現象である。従来の金属・半導体では電荷が、また強相関係数モット絶縁体ではスピがこの輸送現象の担い手であるが、高温超伝導体のようにキャリアがドーパされたモット絶縁体ではこの電荷とスピンの自由度が強くかつ複雑に影響し合い、さらに乱れの効果が相乗してそれらもつ可能性は底知れない。これからの大きな挑戦課題である。本グループは従来から「量子輸送現象」を多面的に研究してきているが、上記のような認識に基づいた現在の研究テーマは以下のとおりである。

1. 分子性結晶の構造と物性の関係についての系統的描像の確立
 - 電荷秩序と磁気および超伝導転移
2. 乱れた強相関係数である遷移金属酸化物の金属・絶縁体転移
 - アンダーソン転移とモット転移の競合
3. 乱れたスピン・パイエルス系における誘電特性
 - 乱れによって誘起された反強磁性長距離秩序と誘電異常
4. 有限系における永久電流
 - 超伝導近接系の磁化とナノ系の軌道磁性
5. DNA の電気伝導



1/4 充ったバンドに対して期待される 2 つの特徴的基底状態：(a) 結合交替が強いときに出現するモット絶縁体 (b) 結合交替が弱く、格子間クーロン相互作用が重要なとき出現する電荷秩序状態 (ウィグナー結晶)



2次元メソスコピックディスク (a) およびリング (b) の軌道磁性。縦軸、横軸は系の大きさをスケールした温度、磁場を示す。図中の LD, dHvA および MF は、それぞれランダウ反磁性、ドハース・ファンアルフェン振動およびメソスコピック揺らぎが見られる領域を示す。アハロノフポーム (AB) 振動は非常に細いリングの場合にのみ見られる。

素粒子実験グループ

Experimental Particle Physics Group

鈴木厚人 教授 山口晃 教授 山本均 教授

白井淳平 助教授 末包文彦 助教授 井上邦雄 助教授

林野友紀 助教授 長嶺忠 助手 長谷川琢哉 助手 古賀真之 助手

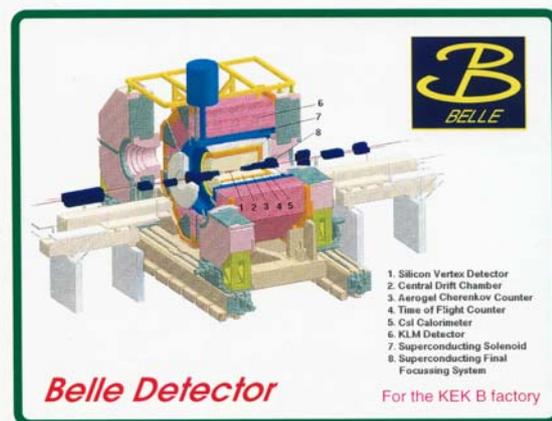
<http://www.awa.tohoku.ac.jp/>

加速器素粒子実験

電子・陽電子などの荷電粒子を加速器によって高いエネルギーに加速しお互いに衝突させると、通常自然界には存在しない B^0 粒子や Z^0 粒子などの重い粒子を生成することが可能である。加速器素粒子実験は、これらの粒子の生成過程や崩壊過程などの素粒子反応を観測・測定することによって、自然の究極の世界における物質とその相互作用の探求を行うことを目的とする。とりわけ、第3世代のbクォークを含む B^0 粒子反応は粒子・反粒子の非対称性を研究する上で極めて重要であり、現在の宇宙には反物質が存在しないことを説明するために貴重な情報を提供する。

BELLE 実験

粒子・反粒子の間のCP対称性の破れは、35年前 K^0 粒子で発見されたが、今日まで、これ以外ではCP対称性の破れは観測されていない。これは、素粒子物理学の謎の一つとして不明のまま残された研究課題である。このCP対称性の破れは小林・益川らによる理論によって素粒子の標準模型の枠内で説明され、重いbクォークを含むB粒子においてもCP対称性の破れがあることが予言されている。この理論を検証すべく、高エネルギー加速器研究機構(KEK)において多量のB粒子・反B粒子を生成する電子・陽電子衝突型加速器(Bファクトリー)が建設され、B粒子・反B粒子の崩壊の僅かな差(CPの破れ)を観測・測定することを目的とするBELLE実験が現在進行中である。本学グループもこの実験に参加し、ガラスを使用した大型高抵抗電極板カウンターを製作した。これは、高い検出効率と一様性を持つ優れた荷電粒子検出器であるが、 K_L^0 粒子および μ 粒子用検出器(KLM)として、 B^0 粒子の J/Ψ と K^0 への崩壊におけるCP対称性の



破れの測定に威力を発揮するものである。

多量のB粒子・反B粒子によるB物理として、上記の(1)間接的CPの破れの他に、(2)直接的CPの破れ、(3) B^0 -反 B^0 粒子混合におけるCPの破れ、(4)希少崩壊などの研究を行なう。また、B粒子と同様にタウレプトン粒子も多量に生成されるのでタウ物理として、(5)レプトン崩壊におけるCPの破れ、(6)セミ・レプトン崩壊におけるCPの破れ、(7)レプトン数非保存など標準理論を越える新しい物理の探究もあり、多くの研究課題が山積みされている。

また、将来のより高いエネルギーでの電子・陽電子衝突型線型加速器における実験に向け、検出器の開発研究及び物理解析手法の研究等を行っている。

すばる望遠鏡による観測的宇宙論

グレートウォール・泡構造が近傍宇宙に発見され、数億光年という巨大なスケールで宇宙は非一様であることが明らかとなった。更に遠方、即ち若い宇宙の構造は、宇宙の起源=インフレーション・ビッグバンを解明する鍵を握る。すばる望遠鏡を用いて超遠方のクェサー・銀河を探查し、遠宇宙の構造と進化を研究する。

非加速器素粒子実験

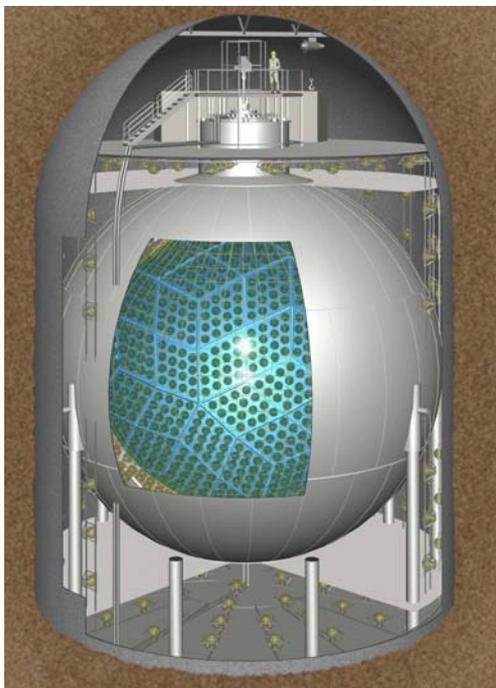
自然や宇宙は巨大な素粒子実験室である。身の回りには宇宙創成期、進化期の情報を持った素粒子がさまよい、地球や太陽、銀河からは絶えず素粒子が放出され、地上に降り注いでくる。これらの粒子を検出して素粒子や宇宙を研究することが非加速器素粒子実験の目的である。

ニュートリノが重要

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(牧・中川・坂田行列)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考えられている。このようなニュートリノの観測研究は、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。

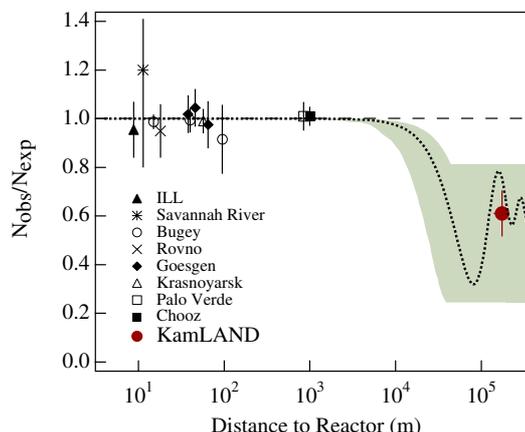
カムランド実験

当研究グループは、極低放射能環境下における超低エネルギー・ニュートリノや反ニュートリノを検出する、世界最大の1,000トン液体シンチレータ検出器を完成させた。



この実験では、①原子炉反ニュートリノ振動検出によるニュートリノ質量の検出、②宇宙反ニュートリノ検出による宇宙構造形成の謎の解明、③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、④太陽ニュートリノ検出による恒星進化の研究を目的とする。

実験施設は岐阜県神岡町神岡鉱山の地下1,000 mに設置され、平成14年1月22日から実験データ取得を開始した。平成14年12月6日には、原子炉からのニュートリノが確かに減少している(ニュートリノ振動によって見かけのニュートリノ数は減少する)事の証拠を発表した。これは、30年以上未解決であった太陽ニュートリノの謎を解明し、ニュートリノの質量構造、牧・中川・坂田行列の未知パラメータを決定する重要な成果である。さらに、地球ニュートリノの観測を示唆するデータも得られ、今後の展開が注目されている。



現在は、ニュートリノ振動の精密測定・地球ニュートリノの観測をめざして、データ蓄積、解析性能の向上に邁進するとともに、太陽ニュートリノの謎解明により可能となったニュートリノによる恒星進化の研究を目指して、低エネルギー太陽ニュートリノを観測するために必要となる純化装置の開発に全力を挙げている。また、この実験はカリフォルニア大学バークレイ校、スタンフォード大学、カリフォルニア工科大学を含む米国11研究機関との共同研究として推進されている。

原子核物理グループ

Experimental Nuclear Physics Group

橋本 治 教授 小林 俊雄 教授

田村 裕和 助教授 岩佐 直仁 助教授 中村 哲 助教授

藤井 優 助手 大津 秀暁 助手

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

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。

当グループは、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、シグマ粒子などのハイペロン(“ストレンジネス=奇妙さ”の量子数を持つ重粒子)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。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)のビームを用いて行っている。そして、(1) 従来の核子レベルの原子核物理学を越えて、強い相互作用によって結びつけられたハドロン多体系の物理を、ストレンジネスを通じてクォーク・レベルにまで立ち戻って究明すること、(2) 陽子と中性子の数が極端に異なる、ハイゼンベルグの安定線から離れた不安定原子核の特異な構造を明らかにすること、が当グループの主要な研究テーマである。これらの研究をさらに発展させるため、東海村に建設中のJ-PARC 50 GeV 陽子シンクロトロン、および2006年完成予定の理化学研究所・不安定核ビーム工場(RIBF)での研究計画の立案や実験装置建設も進めている。

1. ハイパー原子核物理

ハイパー原子核の研究には、さまざまな意義がある。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針として、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。

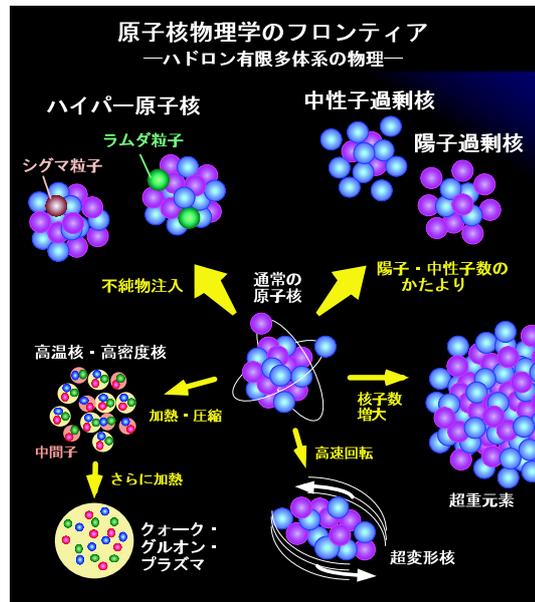


図1: 原子核物理学のフロンティア

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、核力を重粒子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。ハイパー核の崩壊を通じて、重粒子間の弱い相互作用の研究も初めて可能になる。なお、中性子星内部の超高密度物質は巨大なハイパー核として安定に存在していると予想されており、ハイパー核の研究は中性子星の構造の解明にも貢献する。

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) 最近、我々は米国ジェファーソン研究所の超伝導電子加速器を用いて($e, e'K^+$)反応によるラムダハイパー核分光実験に世界で初めて成功した。この新しい研究をさらに発展させるため、現在当グループは総重量約250トンのK中間子測定用高分解能磁気スペクトロメータ(HKS)(図2)を建設しており、2005年より実験が開始される。(2) 高エネルギー加速器研究機構(KEK)の陽子シンクロトロン(PS)では、 π 中間子ビームと、以前当グループが中心となって建設した大型超伝導K中間子スペクトロメータ(SKS)を用

いて、ラムダハイパー核の構造や弱崩壊過程の研究を行っている。(3) 最近我々は、大型半導体検出器システム (Hyperball)(図 3) を建設し、ハイパー核から放出される γ 線の精密測定を世界で初めて成功させた。この方法により、さまざまなラムダハイパー核の精密 γ 分光実験を米国ブルックヘブン研究所や KEK-PS で行っている。(4) 本学原子核理学研究施設の 1.2 GeV 電子加速器を用い、GeV ガンマ線ビームによって生成される中性 K 中間子を中性 K 中間子スペクトロメータで測定し、電磁相互作用によるストレンジネス生成過程の研究を行っている。これらの研究は、いずれも世界の最先端を切り開いている。研究には当グループを中心として他大学や外国の共同研究者も加わり、当グループは世界でも有数のストレンジネス核物理の研究拠点となっている。

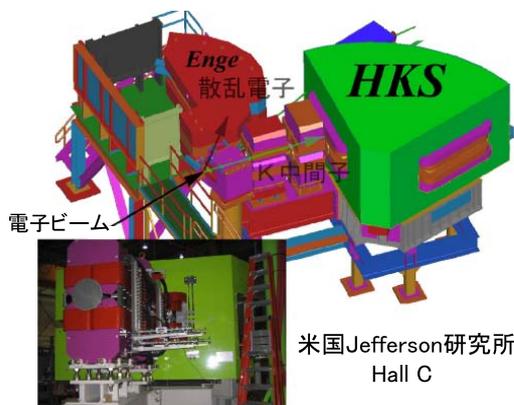


図 2: 電子線によるハイパー核分光用の高分解能 K 中間子スペクトロメータ (HKS)

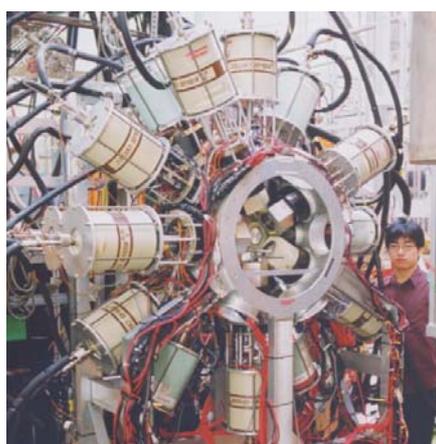


図 3: ハイパー核精密 γ 線分光用の大型半導体検出器システム (Hyperball)

2. RI ビームを用いた Exotic 原子核物理

原子核を構成する中性子 / 陽子の比が非常に大きく (小さく) 大きなアイソスピンを持つ中性子 (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。以前は生成する事すら困難だったこれらの Exotic 原子核 (不安定核) を、高強度・高純度の 2 次 RI ビームとして原子核研究に使用する事が可能となっている。不安定核は、通常安定核には見られない中性子ハロー、中性子スキン、柔らかい巨大共鳴、魔法数の破れ等の面白い性質を持つことが知られている。又これらの短寿命不安定核は、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。

このような Exotic な不安定核の性質を理解する為に、理化学研究所、放射線総合医学研究所、ドイツ重イオン科学研究所 (GSI) 等の重イオン加速器施設を用いて、

- (1) 反応断面積測定による原子核半径の研究、
 - (2) 核子ロックアウト反応による単一粒子状態の研究 (図 4)
 - (3) ドリップライン外側の exotic な共鳴状態の研究、
 - (4) 陽子超前方非弾性散乱による巨大共鳴 (特に巨大単極子共鳴) の研究、
 - (5) 天体核反応断面積測定による星の進化や元素合成に関する研究、
- などを行っている。



図 4: 放医研 HIMAC 加速器施設において核子ロックアウト反応実験用に製作した測定器系: ビーム検出器、固体水素標的、2 アーム陽子検出器、前方磁気スペクトロメータからなる。

中間エネルギー核物理グループ

Intermediate Energy Nuclear Physics Group

坪田 博明 教授* 宮瀬 晴久 教授 前田 和茂 助教授 神田 浩樹 助手

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

中間エネルギー核物理グループは、原子核の集団運動である巨大共鳴、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、ハドロン(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・電子プローブによる原子核研究

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(仮想光子も含めて)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のである。

現在の主な研究課題は、電子線加速器を用いた巨大共鳴の研究、中間子、核子共鳴生成の研究である。また光核反応の逆過程である、核子(中性子、陽子)や原子核の捕獲反応を用いた実験を行い光核反応では調べることの出来ない原子核の構造を解明

する研究を行っている。

原子核集団運動の物理

原子核の集団運動である巨大共鳴の研究には、光子の波長を原子核の大きさ程度に設定すればよい。このときの光子のエネルギーは数十 MeV に相当し、原子核の巨大共鳴が強く引き起こされる。巨大共鳴状態から反応の終状態で放出される核子(陽子、中性子の総称)を測定することで原子核構造、集団運動の形態を精密に調べることができる。

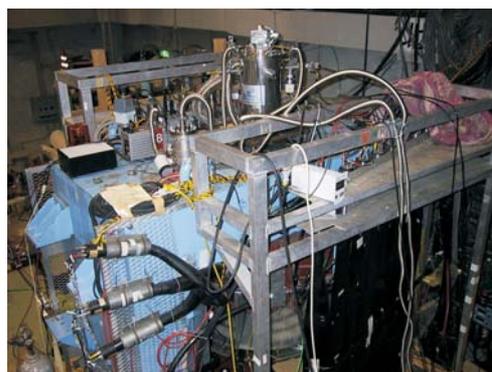
中間子、核子共鳴の物理

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。最近私たちはその様子を初めて観測することに成功した。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偏極した光子や GeV 領域電子線による実験準備を進めている。GeV 領域光子は精密な運動学的条件を設定し $q\bar{q}$ の生成することが知られている。特に私たちのグループでは、ストレンジネス自由度を持つ $s(\bar{s})$ クォークの生成に着目し、原子核内のストレンジネスの振る舞いや核力に $s(\bar{s})$ クォークがおよぼす影響を詳細に調べる実験を行っている。

現在わたしたちはストレンジネスを持つ原子核を調べる上で重要な素過程である $n(\gamma, K^0)\Lambda$ 反応の精密測定を行っている。現実的な中性子標的として、重陽子中の中性子を使用する。常温常圧では気体である重水素を 20K 以下の温度まで冷却して液化し、温度と圧力を長期間にわたって安定に保つための装置の開発し実験に用いている。



K^0 中間子光生成実験の実験装置。左の図は、光子ビームを発生するための電子加速器 (核理研 STB) とその偏向電磁石に設置された標識化光子生成装置を手前に、中性 K 中間子スペクトロメータを奥に望む写真。右の図は中性 K 中間子スペクトロメータとその上部に設置された液体重水素標的装置の冷凍機部分。

図に示してあるのは、 $n(\gamma, K^0)\Lambda$ 反応の測定に使用している、東北大核理研 1.2 GeV STB, 1.2 GeV 標識化光子発生装置、中性 K 中間子スペクトロメータとその上部に設置してある液体重水素標的である。

重陽子標的はストレンジネス生成実験だけではなく、原子核内に生成される核子共鳴の振る舞いや核子の内部構造の研究に ${}^2\text{H} + \gamma, {}^2\text{H} + n,$ 過程などを用いて研究を行う予定である。

私たちはこれらの研究課題を東北大学原子核理学研究施設、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター、理化学研究所 (和光市)、大阪大学核物理研究センター、高エネルギー加速器研究機構 (つくば市)、ジェファーソン研究所 (米国) 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。

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、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の開発研究も行っている。

原子核理学グループ

Nuclear Science Group

笠木 治郎太 教授 清水 肇 教授 浜 広幸 教授

玉江 忠明 助教授 大槻 勤 助教授 河合 正之 助教授

山崎 寛仁 助手 日出 富士雄 助手 神藤 勝啓 助手 結城 秀行 助手

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

原子核理学グループは、理学研究科附属原子核理学研究施設を拠点にして、原子核物理学、加速器科学及び核・放射化学の研究を総合的に進めている。原子核理学研究施設は、1967年から稼働している300 MeV電子線形加速器(電子ライナック)と、1998年から動きだした1.2 GeV電子シンクロトロン(ストレッチャー・ブースタリング)の大型電子加速器を有する東北大学の共同利用加速器施設である。これらの加速器から、60 MeV~1.2 GeVの特色ある電子線を得ることができ、学内外の研究者により、上述の分野での最先端研究が推進されている。原子核理学グループの大学院生は、研究施設の教官を指導教官として、大型加速器を有する研究環境のなかで研究活動に参加する。

原子核物理学分野

近年の加速器及び測定器の進歩はめざましく、特に原子核研究用の連続電子ビーム加速器が世界各地で稼働を開始している。連続電子ビームは、反応によって放出される粒子を電子と同時に検出する実験(同時計測実験)を可能にし、原子核の様々な励起状態とその崩壊機構の解明、核子の励起状態や中間子の核構造への寄与の研究、さらにはクォーク自由度の直接的な検証のための強力な研究手段となりつつある。研究の対象も安定な基底状態からの励起だけでなく、最近では、高速回転する原子核、高温原子核等の極限状態にある原子核の振舞いが注目されている。

1.2 GeVの蓄積電子ビームを用いた実験も始まり、最先端の研究が進められている。すでに、約200本の無機結晶シンチレータからなる大立体角ガンマ線検出器や多粒子検出用磁気スペクトロメータが実験室に設置され、実験が精力的に進められている。また、内部標的実験用の偏極原子核標的の開発も進められている。具体的には以下のような研究を行っている。

1) 核内核子共鳴と中間子生成

GeV領域のガンマ線を原子核に照射し、発生するエータ中間子やパイ中間子を測定することで、原子核内部での核子共鳴状態の性質を調べる研究が進められている。また、K中間子の

測定を通してハイパー核の研究を進めている。

2) 巨大共鳴状態の生成と崩壊

電子線やガンマ線により原子核の巨大共鳴状態を励起し、その崩壊に伴い放出される荷電粒子、中性子を測定している。巨大共鳴のミクロ構造の究明、巨大共鳴の系統性の確立、更に新しい巨大共鳴モードの探索を行っている。

3) 核子放出メカニズムに対する中間子流の寄与や相対論的效果

電子やガンマ線による核内核子の放出反応には、核子を直接たたき出す直接反応の他に、中間子流や相対論的效果も影響を及ぼす。これらの効果を、散乱電子と放出核子を同時に検出する同時計数電子散乱実験によって研究している。

4) 原子核における量子トンネル現象

量子トンネル現象をより深く理解するために、原子核の α 崩壊や超低エネルギー原子核反応を対象にトンネル時間測定等を試みている。

更に、核分裂機構の解明、固体中での低エネルギー核融合反応の研究を電子線以外のビームを用いて行っている。

5) 海外での実験

本施設での実験より高いエネルギー領域における電子散乱実験を米国のマサチューセッツ工科大学やジェファーソン研究所で行っている。これらの実験から、原子核や核子の構造をクォークレベルで調べている。

加速器科学分野

加速器物理の分野では、本施設の300MeV線型加速器および円型加速器(1.2GeVストレッチャー・ブースターリング)の性能向上及び将来の加速器の高度化のために、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、主として加速管での電子自身の航跡場の影響による後続電子のエネルギー分散やエミッタンスの増大、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。この他、本施設で世

界に先駆けて観測された、非常に短い電子集団からの強力なコヒーレント放射をビーム診断に用いるための様々な基礎研究を継続している。他研究機関の共同研究として、高輝度大型放射光施設 (SPring-8) と共に、極端に高輝度な放射光生成を目指して電子蓄積リング内のビームの低エミッタンス化の研究、高エネルギー加速器機構のテスト加速器施設と共に、将来のリニアコライダーのためのビーム診断装置の開発研究を行っている。また、分子科学研究所、パリ南大学 (仏) 及びデューク大 (米) と共に、将来を担う光源開発を目的とした電

子蓄積リングを用いる自由電子レーザーの開発研究及びレーザー光と電子の相互作用の基礎研究を進めている。

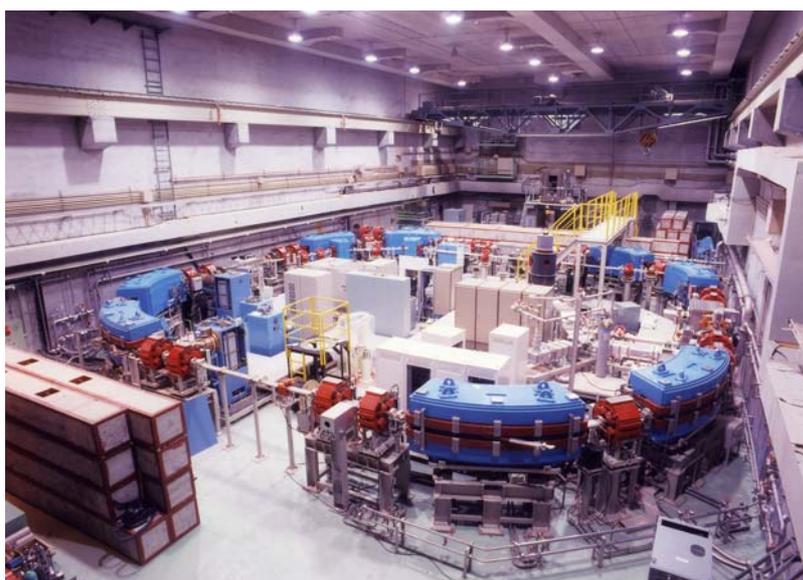
核・放射化学分野

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、最近、 C_{60} フラーレンを電子線や他の荷電粒子で照射することにより放射性 C_{60} の生成に成功した。生成メカニズムと機能の研究が進められている。



東北大学 300 MeV 電子リニアック。日本の高エネルギー電子リニアックのさきがけとなった。

1.2 GeV ストレッチャー・ブースタリング。リニアックからのパルス電子線 300 MeV の連続電子線として取り出す機能と 1.2 GeV まで加速する機能を合せ持つリング型加速器である。



加速器科学グループ

Accelerator Science Group

横溝 英明 教授(客員) 永宮 正治 教授(併任) 佐々木 修 助教授(併任)

加速器科学グループは、大強度陽子加速器そのものの研究(横溝)及び加速器を用いた科学の研究(永宮、佐々木)を行う。

ハドロン科学の研究(永宮正治)

平成13年度より、高エネルギー加速器研究機構(KEK)と日本原子力研究所が共同企画の「大強度陽子加速器プロジェクト」の建設が始まった。このプロジェクトは、世界最強度の陽子ビームを供給するのが目標。そこで展開する科学においては、

1. 3 GeV・1 MWの陽子ビームを用い、中性子ビームやミュオンビームを用いた物質生命科学の研究、
2. 50 GeV・0.75 MWの陽子ビームを用い、K中間子やニュートリノビームを用いた原子核・素粒子の研究、
3. 将来的には、中性子ビームを用いた加速器駆動核変換のR&D、

の三点が目玉となっている。プロジェクトは総額1千億円を越す大がかりなもので、第1期計画は6年の歳月をかけて建設される。当然のことながら、本計画は21世紀の日本の加速器科学の中で重要な位置を占めるばかりか、世界的にも大いに注目されている。

本加速器科学グループは、このプロジェクト建設においてリーダーシップをとりつつ、大学院生を含めたこの分野の若い研究者養成を行う。

加速器を用いた科学の研究では、完成後の大強度陽子加速器における実験計画を念頭に置きながら、現在稼働中の類似加速器を用いて実験研究を行い、完成後に備える。より具体的には、高エネルギー加速器研究機構における現12 GeVシンクロトロンにおける実験研究や、米国ブルックヘブン国立研究所におけ

る重イオン衝突型加速器における実験研究を実施する。

加速器の研究(横溝英明)

「大強度陽子加速器プロジェクト」の加速器は、世界最大強度の陽子ビームを発生・利用する。加速器構成は、400 MeV常伝導リニアック、400-600 MeV超伝導リニアック、3 GeVシンクロトロン(330 mA、1 MW)、50 GeVシンクロトロン(15 mA、0.75 MW)から構成される。3 GeVシンクロトロンの出力は、主に中性子散乱実験施設に供給され、一部分を50 GeVシンクロトロンに供給される。中性子散乱施設へ供給される陽子ビーム強度は当初1 MWではあるが、将来5 MWにまで増強することも考えている。このような大強度の陽子加速器加速器を建設するには、多くの技術課題が山積しており、大電流イオン源、超伝導加速空洞、リング用高電界加速空洞、セラミック真空ダクトなど世界最先端の技術開発を行っている。

加速器を用いた大規模実験用測定器の研究

(佐々木修)

2006年の完成を目指して建設が始められている欧州合同原子核研究機関(CERN スイス)でのLarge Hadron Collider(LHC)加速器を用いたATLAS実験のための測定器の開発・研究を行っている。ATLAS測定器は、各種粒子検出器が一体となった大型実験装置であり、実験参加国がそれぞれの粒子検出器の各部分の建設を分担し、国際協力としてその建設が行われる。日本グループが担当している測定器の1つがミュオン測定器であり、測定器本体、測定器用電子回路及びデータ収集用ソフトウェアの開発を行っている。実験用測定器技術の習得と若手研究者の育成を行う。2007年からの本実験では、ヒッグス粒子や超対称性粒子の発見など素粒子物理学の本質的発展が期待されている。

ミクロ物性物理グループ

Microscopic Research on Magnetism Group

小野寺 秀也 教授 高木 滋 助教授 東方 綾 助手

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

[はじめに]

固体内のイオン殻の作る周期ポテンシャルの中をクーロン力により強く相互作用しながら運動する高密度の電子は現在の固体電子論の多くの難問題をもたらす主役の一つです。この運動による電子の「遍歴性」と電子間の強い相互作用による「局在性」が織りなす多彩な物性現象の多くは、様々な物質系で従来の概念では理解できないものとして現れ、それらを統一的に説明する新しい概念の構築が求められています。また近年、局在性の強い電子が作る多極子モーメントの一つ、電気四極子モーメントの秩序相転移が発見され、磁気双極子モーメントと絡み合った新奇で多彩な磁性が注目を集めています。

[ターゲット]

(1) 強く相互作用しながら運動する電子系、「強相関電子系」の問題を、3d 遷移金属、4f 希土類、5f アクチナイドの化合物、さらに低次元有機化合物、金属配位錯体と非常に幅広い物質を対象として調べています。特に、これらの物質が示す金属・絶縁体転移および転移に近い異常金属相、圧力誘起相転移、価数揺動状態、重い電子状態、低次元量子スピン系などの問題を中心に研究しています。

(2) 希土類化合物における局在する電子の四極子モーメントの秩序相転移、磁気秩序との競合・共存が示す異常な物性現象を調べています。四極子秩序を示す化合物は極めて少ないのですが、我々が発見した新しい四極子秩序希土類化合物は、多彩な磁性現象を発現し、興味の尽きない研究対象になっています。また、アクチナイド化合物の多極子モーメントの秩序と揺らぎの問題も主要なテーマの一つです。

[研究手法]

我々はまず純良な単結晶試料を自ら作製することから始め、磁気測定、磁場中比熱等の基

礎物性測定を踏まえて、原子核の磁気モーメントをプローブとするミクロな実験手法である核磁気共鳴 (NMR) と、原子核の線共鳴吸収を利用するメスバウアー分光を主要な手段として研究しています。原子核の磁気モーメントは「適度」な強さで電子系のスピンと相互作用しており、原子核はこの「適度さ」ゆえに電子系の「クールなプローブ」として、しかも予め植え込まれた「天然のプローブ」として、電子系の状態についてミクロな立場から非常に有用な情報を提供してくれます。さらに、中性子のスピンと磁気モーメントの相互作用を利用する中性子散乱実験も有力な実験手段として用いています。

また、必要に応じてミュオン・スピン共鳴、圧力下の磁性、伝導測定、超音波吸収による四極子応答測定など国内外の多くの研究者との共同研究を積極的に進めています。

[さらに]

新しい四極子秩序化合物、さらに高次の多極子である磁気八極子モーメントが主役を演じる舞台としての化合物の発見を夢見て、物質探索を日々行っています。



テトラアーク単結晶引上炉 (2 台)

物質構造物理グループ

Materials Structure Physics Group

村上 洋一 教授 岩佐 和晃 助教授 松村 武 助手 中尾 裕則 助手

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

1. はじめに

物質は、膨大な数の電子が互いに作用しあうことで、少数の電子からは予想もつかない多様な性質を示すようになります。その多様性の背後にひそむ美しい統一性を探り、さらには新しい性質を引き出すための研究が物性物理学です。電子には電荷・スピン・軌道の自由度が存在しますが、原子の配列である結晶格子の上でこれらがどのように振る舞うかを研究することで、物質の示す様々な現象、例えば、超伝導や磁性の発現、金属から絶縁体への転移、結晶構造の変化などの原因を探ることが出来ます。私たちのこのような研究活動は、本学内の基礎物性測定だけに留まらず、下記のような大型研究施設を利用した放射光X線散乱実験や中性子散乱実験へと広がっています。

2. X線散乱

結晶格子の間隔と同程度の波長をもつ光、X線は古くから結晶構造の解析に用いられてきました。近年のシンクロトロン放射光の発展により、従来の100万倍以上の高い輝度をもち、波長や偏光を制御できるX線が得られるようになりました。放射光X線の共鳴現象を用いて、今まで直接とらえることの出来なかった軌道の自由度を観測することが可能になり、本研究グループもその実験手法の確立とそれを用いた新しい物性研究で世界をリードしています。これらの研究は、放射光研究施設 Photon Factory

(つくば)、SPring-8(播磨)の構造物性ビームラインにおいて行われています。

3. 中性子散乱

中性子は原子核との衝突や磁気モーメント(スピン、原子レベルの磁石)との相互作用によって散乱されます。この粒子としての性質と同時にX線同様の波動性も備えているため、波長が 10^{-10} m程度の中性子は原子や磁気モーメントの配列によって回折され、物質構造のみならず磁気構造も明らかにできます。さらに原子や磁気モーメントの振動と同程度のエネルギーを持つため、散乱前後の中性子の運動量とエネルギーの変化を通して格子振動やスピン波励起などの物質内集団運動が観測されます。このように中性子散乱は物性物理学における最も重要な実験手段の一つです。本研究グループはその黎明期から研究用原子炉(日本原子力研究所東海研)に独自の装置を所有して、大学の研究室としては世界的にも希少な環境で研究を展開しています。

4. 研究方針

スピンと軌道の自由度がもたらす多彩な現象を理解するために、典型物質の探索と高品質の単結晶育成、基礎物性の測定、X線・中性子散乱によるそれら自由度の静的・動的性質の探求、という系統的な研究体制をとっています。さらに散乱研究発展のために新しい実験手法の開拓や装置開発も行っています。



東北大学中性子散乱分光器 TOPAN(東海) 放射光X線6軸回折計 BL-16A(つくば)

低次元量子物理グループ

Low-Dimensional Quantum Physics Group

豊田 直樹 教授 松井 広志 助教授

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

電子の運動を1次元、あるいは2次元の空間に制限した舞台をつくり、そこで発現する多体的電子状態と集団的協力現象(超伝導、磁気秩序、誘電性、金属・非金属転移、非線型伝導など)を実験的に研究しています。

現在集中的に研究しているテーマは、(1) 準2次元伝導を担う層と反強磁性的に相互作用する絶縁体層が、交互に繰り返す分子性ヘテロ超格子での超伝導・反強磁性・金属絶縁体転移という3種類の電子秩序状態の解明と、これらに誘電性が絡んだ新しい電子相の探索、(2) カーボンでできた極小曲面型多孔体(韓国高等科学技術研究所、ストックホルム大学アレニウス研究所)、1次元チャンネル内で成長させたカーボンナノチューブ(香港科学技術大学)の伝導現象の解明と、新奇ナノ多孔性物質の探索、(3) 塩基配列を制御したDNA結晶の高周波伝導現象の解明(大阪大学産業科学研究所、熊本大学)などです。

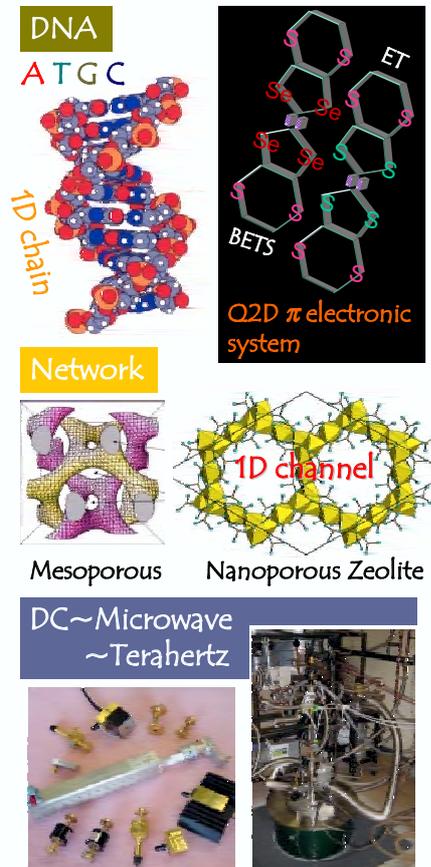
これら物質について、低温(0.4 K)、磁場下(14.5 T)における伝導・誘電現象を、直流からマイクロ波・ミリ波を経て、テラヘルツ域に至る広帯域な電磁場により計測しています。これら電磁場のエネルギーは低く、低エネルギー励起を研究する上で最も強力な手法です。その物理的理由は、多体的電子状態やその協力現象である集団的秩序状態は、多くの場合フェルミ準位近傍の低エネルギー励起や、電荷やスピンのエネルギーギャップ内の集団的・個別的励起にその本質を見出せるからに他なりません。当研究室の究極の目標は、温度と磁場を制御した熱力学的環境下でまったく未知の量子現象や電子相を発見することにあります。

装置に関しては自主開発しているものがほとんどで、マイクロ波帯の超高感度空洞共振器やラジオ波域の反射測定装置の開発を行ってきました。大型科学研究費によりテラ波分光装置(0.1 - 2 THz)を導入し、現在は低温下における透過計測の技術開発を進めています。このエネルギー領域は、これまでの物性研究で「空白域、テラギャップ」と呼ばれており、世界的にも極めてユニークな装置となることを目指し

ています。

一方、有機・無機分子の合成や高品位単結晶の育成といった物質創製がもう一つの課題です。ナノ物質に関しては、欧米や中国、韓国の研究機関と国際共同研究を行うと同時に、21世紀COEフェローが独自のナノ多孔性物質創製に取り組んでいます。

このように私たちの研究室は、伝統的な物性研究の枠を超えた、新しい学問分野の構築を目指すと同時に、教育・研究指導では固体物理学実験の基礎訓練を習得させ、将来多用な分野、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。21世紀COE(「東北大学・物質創製研究教育拠点」)のメンバーとして、特に若い学生諸氏が積極的に参加されることを期待しています。



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 助手

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

1. 研究内容

本研究室では、光電子分光法を主な実験手段として、高温超伝導体や f 電子系化合物に代表される強相関電子系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。強相関電子系で観測される特異な物性(超伝導、金属-絶縁体転移、電荷密度波等)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。

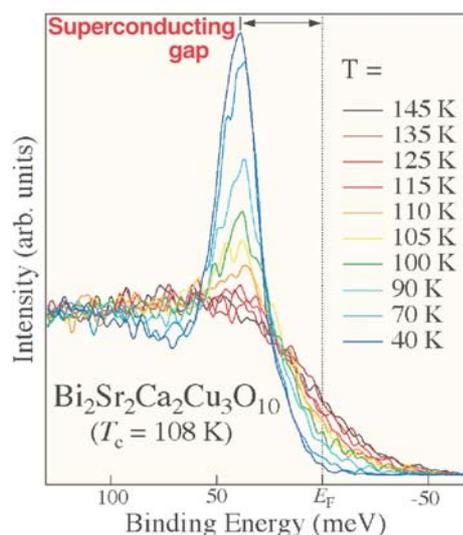
本研究室では、世界最高水準の超高分解能光電子分光装置の建設・改良を行うと同時に、高温超伝導体を含む強相関電子系の特異な物性発現機構とその電子構造の関係を明らかにする研究を行っている。現在進めている具体的な研究は、以下のとおりである。

- (1) 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 (quasiparticle)」の形成過程と超伝導発現機構の関係
- (2) 金属系高温超伝導体 MgB_2 に代表されるホウ素新規化合物の電子構造と超伝導発現機構
- (3) 低次元強相関化合物における電荷密度波 (Charge Density Wave, CDW) 転移機構と、一次元金属における「スピン-電荷分離」機構
- (4) 新規カーボン化合物 (フラーレン、カーボンナノチューブ等) の電子構造
- (5) 強相関 f 電子系の物性発現機構と電子構造の関係

2. 主要な設備

- (1) 超高分解能角度分解光電子分光装置: 2 台
 - (2) 高分解能光電子分光装置: 1 台
 - (3) 高分解能角度分解光電子分光装置: 1 台
- 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

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。



角度分解光電子分光による高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ の超伝導ギャップの直接観測



超高分解能角度分解光電子分光装置

ナノネットワーク固体物理グループ

Solid State Physics on Nano-Network Solids Group

谷垣 勝己 教授

<http://sspns.phys.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。この様な物性分野の進展は、これまで微細加工技術を基礎として進められてきた。現在では、電子線加工技術などにより数百程度のサイズの加工が可能である。さらに、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に示すナノクラスタネットワーク構造は、自然の自己形成機能により形成される。従って、ナノ領域のサイズを有するクラスタを基本構成要素として創生することのできるナノネットワーク固体は、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言える。

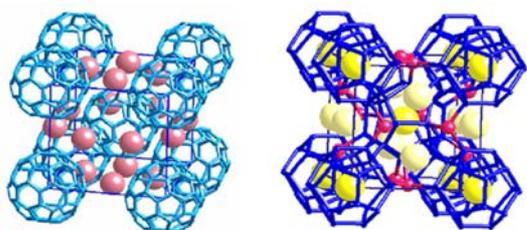


図1 . C_{60} および $(Si/Ge)_{20}$ 多面体ネットワークから構成される固体。

電気伝導はスピンと電荷をともなうフェルミ粒子である電子が運ぶ電荷の流れであり、磁性はそのスピンにより作りだされる磁気モーメントがスピン配列により物性として顕在化したものである。電子スピンの他の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、超伝導が発現する事も可能となる。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ていて、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。

本研究グループでは、IV族元素を中心とするクラスタを基本構成要素として新しいネットワーク固体を創製して、ナノ構造に基づいて発現する伝導および磁性を探究している。炭素(C)のような正五角形と正六角形ネットワークにより構成される C_{60} は、ファンデアワールス固体であるのに対して、五角形だけから構成される $(Si/Ge)_{20}$ は共有結合固体である。クラスタ固体が特徴として有する、図2に示すような階層的な構造を利用して、クラスタ固体に伝導に關与する原子や磁性に關与する原子を導入する事により、ナノ多面体クラスタネットワーク固体で特異な伝導や磁性を発現させることを考えている。そして、このような基礎的な理解にもとづき、次世代の新素材につながる研究を目指している。

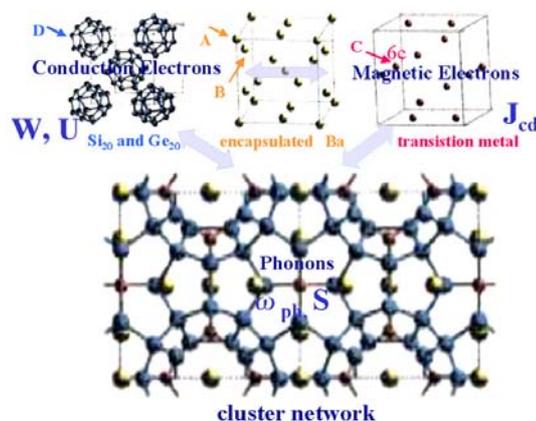


図2 . ナノクラスタネットワーク階層構造に存在する種々の相互作用。

極低温科学センター・極低温量子物理グループ

Very Low Temperature Physics Group - Center for Low Temperature Science

青木 晴善 教授 落合 明 助教授 木村 憲彰 助手

<http://www.clts.tohoku.ac.jp/index.html>

物質は 10^{24} ものオーダーの数の電子が集まった巨大多体系です。特に、強相関電子系と呼ばれる一群の物質は、多体系ならではの実にさまざまな興味ある量子現象を示します。新しい現象の発見は新しい物理の展開ばかりでなく、しばしば新しいテクノロジーの発展につながります。

本研究グループでは強相関電子系を主な対象として、以下のことを目的として研究を進めています。

- (1) 新しい物理の展開につながる可能性を秘めた新物質の開発。
- (2) 物質の真の姿を明らかにするために不純物や欠陥を徹底的に排除した純良試料作製。
- (3) 極低温、強磁場、高圧などの極限環境を用いて、超伝導や磁性などの物性の測定や物性の起源となる電子状態の解明。
- (4) 極限環境によって物性・電子状態を意図的に制御して発現させた新しい物性、現象。

現在は、以下のようなテーマに取り組んでいます。

- a) 量子臨界点と新しい電子相：高圧、強磁場などの極限環境の印加によって、物質の状態を臨界点近傍に置き、そこで生じる非フェルミ流体、磁気的な力を媒介とした超伝導などの新しい物性の発現やその起源となる電子状態を調べています。
- b) 自発的低次元化物質：3次元物性を突然1次元或は2次元物性に変化させる物質があります。低次元化機構の解明と低次元系の磁性と伝導について研究しています。
- c) 多重極秩序とその起源：スピン、電荷以外に電子が持つもうひとつの自由度(軌道の自由度)が磁性などの物性に果たす役割について研究しています。
- d) 化合物混晶と新奇な磁性、量子相転移：物質を構成する一部の元素を別な元素に置き換え、種々の相互作用の相対的な大きさが変化させることにより、新しい物性の探索や電子状

態の研究を行っています。

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。

また、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。

なお、本研究グループは理学研究科物理学専攻の電子物理学講座の一員として研究を推進するとともに、学内の低温研究に関するセンターとして共同研究の推進、研究の支援を行っています。



(上) 新機能物質創製用3ゾーンタングステンヒーター炉(最高温度2300以上)、(下) 極限環境下物性測定装置(最大磁場17T、最低温度20mK、最大圧力3GPa)

超伝導物理グループ

Superconductivity Physics Group

小林 典男 教授 佐々木 孝彦 助教授

西寄 照和 助手 米山 直樹 助手 工藤 一貴 助手

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

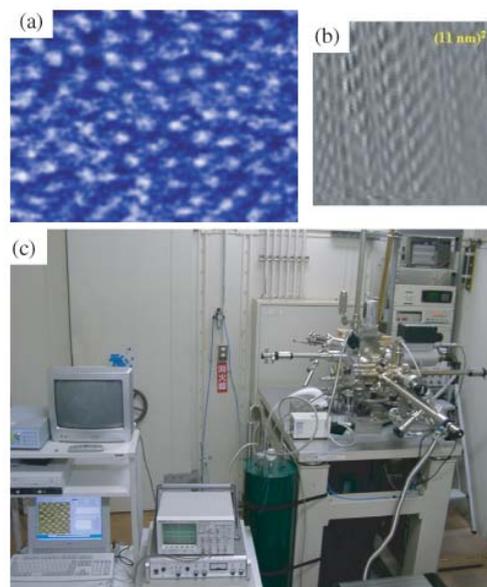
超伝導は金属中の膨大な数の電子が全体として一つの状態になった、巨視的なスケールで実現された量子状態である。このような巨視的量子状態が出現するメカニズムを明らかにすることと形成された量子状態における多彩な物理現象の起源を探ることが本研究グループの目的である。

超伝導研究は、1986年に銅を主要構成元素としたいわゆる銅酸化物高温超伝導体が発見されて以来、新しい展開を迎えることになった。銅酸化物高温超伝導体は、超伝導転移温度が150 Kにもなり、さらに高い温度での超伝導が期待されている。高温超伝導出現のメカニズムは、多くの研究者の懸命の努力にもかかわらず未だに不明である。しかし、超伝導波動関数の対称性や電子・スピン状態に関する研究が進み、ようやく輪郭が見えてきたように思われる。高温超伝導の特色は電子間の強い相関にあり、これが高温超伝導体における特異な電子状態やスピン状態を引き起こしていると考えられている。

一方、銅酸化物高温超伝導体の磁場中（混合状態）の物性に、従来の金属系超伝導体とは異なった多くの興味深い現象が観測され、これを理解するために、磁束ガラス状態の存在や磁束系の融解相転移、2次元 - 3次元クロスオーバーなどの新しい概念が導入されている。しかし、研究が進むにしたがってこれらの概念は決して高温超伝導体に特有な性質ではなく、従来から知られていた超伝導体にも適用でき、より普遍的な現象の1つの極限として出現していることがわかってきた。さらに、この種の物質を扱うための方法論や合成技術あるいは結晶作製技術が飛躍的に進歩した結果、この領域における新奇で多彩な物性の存在が明らかになるようになっている。たとえば、電子顕微鏡や微視的な表面観察技術の進歩によって、超伝導体中の磁束を直接観察することや磁束内部

の電子状態などのミクロな観測も可能になり、超伝導状態におけるマクロな性質とミクロな電子状態との関連が明らかにされつつある。

この分野の重要テーマは、磁場と温度の関数として酸化物超伝導体の混合状態の相図を確立し、上記のような新しい考え方の真偽を明らかにすること、そして混合状態における磁束の運動に関連した熱力学と動力学を確立することである。このために、我々は世界でもっとも純良な高温超伝導体 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$) の単結晶や種々の有機化合物超伝導体を用いて、30 Tにおよぶ強磁場中での輸送特性、磁化測定、熱磁気効果などのマクロな測定に加えて、低溫走査型トンネル分光顕微鏡による磁束の直接観察などの手段をつかって研究を進めている。またこの磁束状態の研究は超伝導材料の応用研究と密接な関係を持ち、21世紀に向けて超伝導応用を目指した基礎研究も行なっている。



(a) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 単結晶表面上の磁束像 (b) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 単結晶の CuO 鎖上 CDW 像 (c) 極低温高磁場中 STM/STS 装置

金属磁性グループ

Metallic Magnetism Group

山田 和芳 教授

大山 研司 助教授 藤田 全基 助手 平賀 晴弘 助手

<http://www.yamada-lab.imr.tohoku.ac.jp/>

ふだん我々がなにげなく手にする物質の中では、天文学的な数の原子核と電子、あるいは電子同士の相互作用が織りなす神秘的現象が起こっています。特に金属あるいは金属化合物磁性体では、多彩な相互作用の微妙なバランス関係で、さまざまな性質が現れたり消えたりします。超伝導と磁性との競争・競合関係はその典型例です。どのような物質でどのような性質が現れるかを、現代物理学では完全には予測出来ておらず、新しい物質探索を含めた実験的手法による研究が重要となっています。

機能性材料の観点からは、超伝導性、磁性、誘電性などさまざまな機能性を示す材料が合成され、それらの性質を、物質中の原子核と電子、あるいは電子同士の相互作用の立場から理解し、新しい材料探索の指針にしようとしています。

我々の研究室では、電子のスピンと軌道状態が関与した現象（高温超伝導、磁気抵抗効果など）を中心テーマとしています。新しい現象を求めて新しい物質を合成する一方、現象は既知だが、その機構が未解決な場合は、その現象を示す典型的物質を探索し、試料の純良化と単結晶育成を行っています。現在、遷移金属や希土類金属、及びそれらの化合物や酸化物の磁性と磁性が関与する伝導現象を中心テーマとしています。

我々の研究室では、原子・電子レベルの現象やミクロな構造を見分ける特別の「眼」を使って研究しています。それは中性子回折や中性子分光と呼ばれています。中性子回折では物質の中の原子核の配列模様、すなわち結晶構造、あるいはミクロ磁石の配列、すなわち磁気構造を決めることができます。一方、中性子分光では、結晶構造や磁気構造の振動を波の成分に分類して観測することで、原子間や電子間、

あるいはそれらの相互作用の強さを調べます。中性子実験では、東海村原子力研究所の改3号原子炉に金研が設置した中性子回折・散乱装置 (HERMES, KSD) をはじめ、諸外国の中性子散乱施設 (アメリカ、フランス、イギリスなど) も利用しています。さらに中性子散乱実験の効率向上に向けての技術開発、特に微小試料の測定方法も開発しています。研究室では、結晶育成のほか、磁化や電気抵抗測定等を用いた研究を行っています。



金研中性子回折装置 HERMES

上の写真は、我々の研究室が日本原子力研究所（東海研）に設置している中性子回折装置 HERMES です。散乱角1度おきに150本の中性子計数管を並べ、角度1度分をスキャンする事によって150度分の回折データが得られる実験能率の高い装置で、磁気モーメントの並び方や大きさ、また結晶構造の研究に活躍しています。この装置は中性子ビームのみを取り出す中性子導管に設置されていて、原子炉室から離れたクリーンな環境下で実験を行なう事ができます。

ナノ材料物理グループ

Nanostructured Materials Physics Group

岩佐 義宏 教授 田口 康二郎 助教授 竹延 大志 助手 小林 慎一郎 助手

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

物質科学・材料科学は、すべての科学・産業の基盤となる学問で、この発展なくして根本的な社会の発展はありません。本研究室では、新物質・新材料の開発とそのバックグラウンドになる新しい物理原理の探求を行うことによってこの分野へ貢献することを目指しています。とくに、従来の無機固体とは異なりナノスケールのユニットをもつ新材料(有機分子やクラスターなど)とその集合体を対象として、超伝導を中心とした物性物理から分子エレクトロニクスにいたる研究を行っています。

下図には本グループが特に興味をもっている研究対象物質を示します。図1は、フラーレンと呼ばれる炭素のみからなる球殻状分子で

す。フラーレン分子及び固体の物性は特徴的な波動関数に支配されます。図2は、同じく炭素のみで形成されるナノスケールの筒、カーボンナノチューブです。この中には、有機分子など様々な分子を挿入することが出来ますが、このような複合化によって、ナノチューブはより新しい機能を獲得します。図3は有機-無機複合超伝導体です。金属と窒素で形成された電子伝導層にアルカリ金属と有機分子を挿入して電子をドーピングすることによって、 T_c が25 Kに至る超伝導体となります。図4には、自己組織化単分子膜によって界面修飾された有機電界効果トランジスタの構造が示してあります。

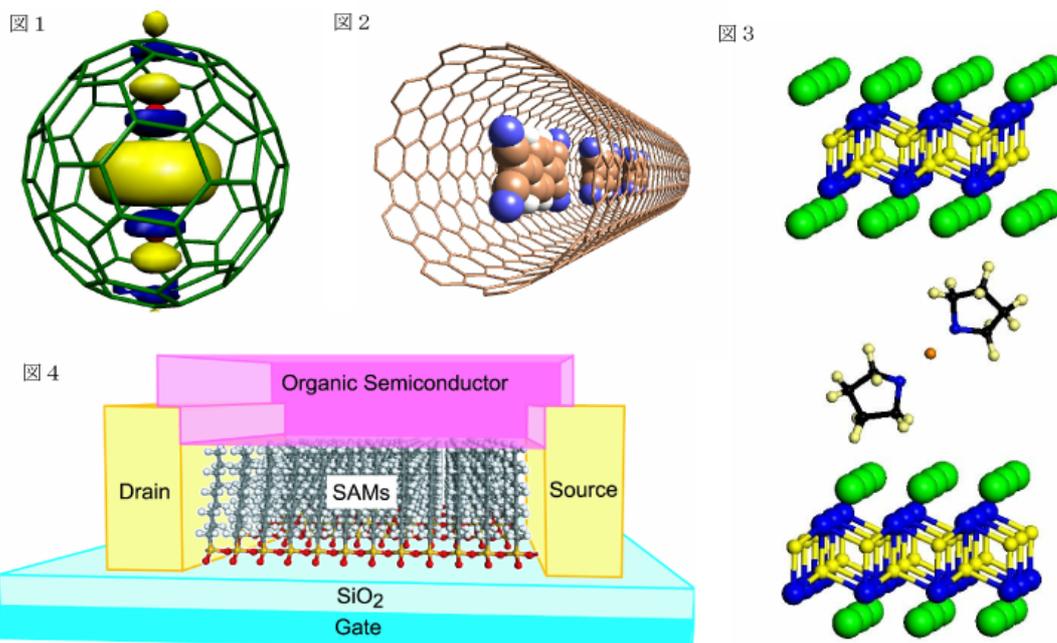


図1：ランタン原子を2個内包した金属フラーレンの最低非占有軌道 (LUMO)。波動関数は、金属上に局在しています。

図2：カーボンナノチューブ。内部に様々な物質を導入して、物性制御を行います。

図3：有機-無機複合系層状窒化物超伝導体の結晶構造。

図4：有機電界効果トランジスタの概念図。自己組織化単分子膜によって界面修飾を行い、特性を向上させることができます。

強磁場物性グループ

High Magnetic Field Condensed Matter Physics Group

野尻 浩之 教授

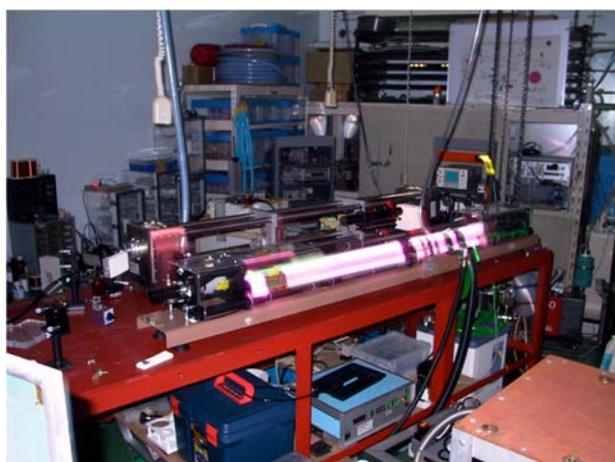
茂木 巖 助手

物質と磁場の物質への作用は、電子のスピンや軌道運動を通してあらゆる物質との間に起こる振る舞いであり、磁場に引き寄せられる磁石だけがもつ特別な性質ではない。強磁場物性物理学では、世界最高水準の定常及びパルス強磁場発生装置を駆使して、物質の磁場中における振る舞いを研究している。現在中心的な課題として取り組んでいるのはナノスケールの分子磁性クラスターの研究である。ナノ分子磁性クラスターは、独立したクラスターの集合体と見なせ、バルク結晶を用いて単一クラスターの性質を研究できるため、ナノスケール磁石の研究におけるもっとも有力な舞台となっている。

小数のスピンから構成されるナノスケール磁石は、自由度が有限で量子系特有のエネルギー準位の離散性があらわに顔を出す。例えば、ナノスケール磁石において磁場を高速に反転させると、エネルギー的には損であるのにスピンの磁場と反対方向を向いて取り残される。これは、エネルギー準位が離散的なために、一旦ある状態に移ったスピンは、準位交差がない限り他の状態へ移れないためである。我々は、時間変化する磁場を駆使することにより、スピンを波動関数レベルで制御し、自由に操ることを目指している。その対象としてスピ

ン多面体やスピントチューブなどの新しいトポロジをもったスピン物質を発掘し、並進対称性のあるバルク結晶では見られない新しい性質を探求している。このような研究は磁性体の比較的長いコヒーレンス時間を利用した量子コンピューターへの応用はもとより、磁性体をナノスケールの情報素子として利用する情報物質学ともいべき新しい分野の先駆けとなると期待される。

このような研究を進める強力な手段となっているのが、金研の30テスラハイブリッド磁石や50テスラを越える強磁場を発生するパルス磁石である。世界屈指の性能を誇るテラヘルツ ESR 装置、世界最高記録を樹立した強磁場 X 線散乱装置や中性子散乱装置、0.1 K 以下の超低温を生成する希釈冷凍機のユニークな現有装置群の他、自由電子レーザーとポータブルパルス磁場を組み合わせたテラヘルツ磁気分光装置、強磁場ラマン散乱装置などの開発も進め、スピンに関する先端分光の拠点を形成している。そのため、国内はもとよりアメリカ、イギリス、ドイツなど海外との共同研究を協力を押し進め、グローバルな研究の展開を図っている。



テラヘルツ ESR 装置

極低温科学センター・低温物質科学グループ

Low Temperature Material Science Group - Center for Low Temperature Science

野島 勉 助教授 中村 慎太郎 助手

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

本研究グループは、低温においてその特性が顕著に現れる、超伝導体(酸化物高温超伝導体や金属超伝導体)や強相関磁性体(マンガン酸化物や希土類化合物)といった物質を対象とした物性研究を行っている。これらの示す物理特性を解明することに加え、その性質を応用しながら通常では存在し得ないような変調構造をもった物質を人工的に開発し、低温での新しい物理現象を探索することを目標としている。

この目標を達成するため、薄膜作製技術により新しく開発した超伝導・磁性体試料や両者の接合試料、および種々の単結晶試料を用い、低温(数10mK - 300K)・磁場中(0 - 14T)での性質を磁化、比熱、輸送特性といった実験手段により研究している。また、極低温領域で働く新しい実験装置の開発も行っている。以下のようなテーマが進行中である。

(1) 超伝導/強磁性接合系での超伝導特性

強磁性体と超伝導体をトンネル接合した系では、超伝導体中の電子スピン密度がアンバランスとなった非平衡超伝導状態が起こることが予想される。この特殊な状態を酸化物磁性体と酸化物超伝導体の接合膜により実現し、その特性を解明する。

(2) 高温超伝導体の磁場中秩序状態の研究

強磁場中の超伝導体では、試料に小さな欠陥が多数存在すると、量子磁束と欠陥の相互作用により、磁束ガラス相という超伝導秩序が形成される。高温超伝導膜に欠陥を人工的に導入することにより、様々なガラス相を実現し、その動的・静的特性を研究する。

(3) MgB_2 超伝導体の磁束系相図

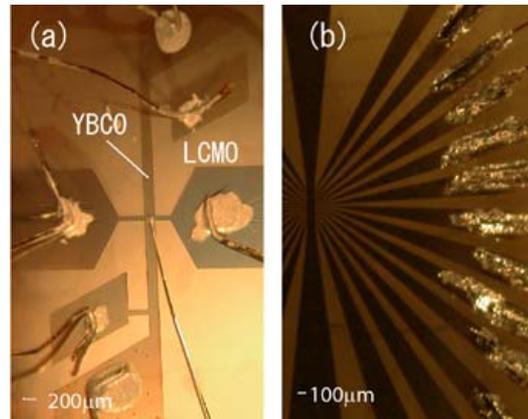
近年新しく発見された MgB_2 の電気伝導や磁化特性を薄膜や単結晶試料を用いて測定し、この超伝導体における量子磁束系相図およびその起源を明らかにする。

(4) 希土類化合物の低温物性の研究

(Ce,La) B_6 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度付近での量子相転移の研究を、極低温下での比熱、磁化、電気伝導の測定により行う。

(5) 極低温磁化測定装置の開発

3He 冷凍機とファラデー法を組み合わせた極低温で働く高精度磁化測定装置の開発を行い、超伝導体、磁性体の低温磁気特性を調べる。



微細加工した (a) 酸化物超伝導体/強磁性体トンネル接合、(b) 高温超伝導 ($YBa_2Cu_3O_7$) 薄膜



3He 冷凍機と磁化測定装置の開発

アクチノイド物理グループ

Actinide Physics Group

水木 純一郎 客員教授 目時 直人 客員助教授 村松 康司 客員助教授

アクチノイド化合物における 5f 電子状態の研究は、現在の固体物理学の重要な研究テーマの一つである。強磁性超伝導体 UGe_2 及び $URhGe$ や、新しい高温超伝導体 $PuCoGa_5$ は、多くの研究者の強い興味を引いている。当グループは、連携大学院制度に基づき設置され、Spring-8 や研究用原子炉 JRR-3 など日本原子力研究所が所有する世界有数の研究施設を利用し、研究活動と人材育成を行うことがその目的である。国際規制物質のために大学では取り扱いが困難なアクチノイド化合物の研究を通して、物質科学における新しい概念の構築を目指す。

アクチノイド化合物の結晶及び磁気構造、そして多極子秩序や、重い電子系超伝導化合物の磁性と超伝導の相関について、主として原研研究用原子炉 JRR-3M に設置された中性子 3 軸分光器をフルに活用して研究を行っている。ここでは、極低温 (10mK)、強磁場 (14T)、超高压 (5GPa) などの極端条件下及びそれらの複合条件下における中性子散乱実験が可能である。原研先端基礎研究センターには、極めて高品質の試料を提供できる物質開発グループ、ウラン NMR グループ、そして理論グループが活動し、アクチノイド系の物理に関する世界的な研究拠点を形成している。

放射光利用研究では、世界最高性能の放射光施設 SPring-8 に 4 本の専用ビームラインを建設し、電子構造および結晶構造に関する研究を進めている。特に、表面・界面構造研究、新しい分野である X 線非弾性散乱の研究に力を入れている。表面・界面構造研究では、電気化学に代表される液体/電極界面構造を、電場中 X 線回折により解析し、電析過程での薄膜構造を調べることによって、他の方法では得られない新物質作成の可能性を探っている。さらに、分子線エピタキシ装置と回折計を組み合わせた in-situ MBE 回折により化合物半導体の非

平衡からの結晶成長機構を原子レベルで理解することを試みる。X 線非弾性散乱では、超巨大磁気抵抗効果を示すペロブスカイト Mn 酸化物や高温超伝導体物質の電子励起に関する情報を直接観測することによってそれぞれの機構解明を目指す。



冷中性子三軸分光器 LTAS と液体ヘリウムフ
リー希釈冷凍機及び 10T マグネット



多目的多軸 X 線回折計

放射光・光電子物理グループ

Synchrotron Radiation and Photoelectron Physics Group

鈴木 章二 助教授

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

当研究グループでは、光電子分光および逆光電子分光を用いて様々な物性的に興味ある物質の電子状態(電子構造)と特異な物性発現(重い電子、量子閉じ込め効果、表面準位等)との関係を明らかにする研究を行っている。光電子分光法は、外部光電効果を利用して物質の電子状態を研究する最も直接的な実験手段であり、近年のエネルギー分解能の向上により、物性研究における重要な実験手段となっている。

現在進めている研究テーマを以下にあげる。

- (1) 超薄膜金属における量子化電子準位
- (2) 金属表面および半導体・金属界面の電子状態
- (3) 表面修飾金属ナノ粒子等における量子化電子状態
- (4) d、f 電子系物質薄膜表面・界面の電子状態

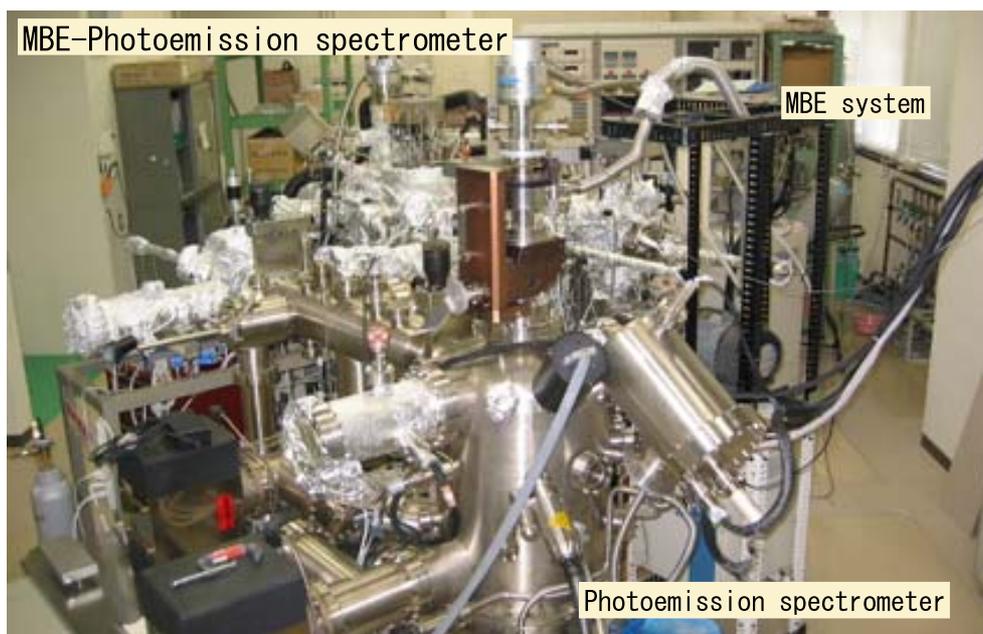
これらの研究を行うために研究室では、超高真空排気系を基礎とした角度分解光電子分光装置や逆光電子分光装置さらにX線光電子分光装置を備えている。また、「量子化準位」を研究するための超薄膜を作成評価し、その場で光電子分光測定が行える分子線結晶作成

(MBE)・光電子分光複合装置を有している。

分子線結晶作成装置(MBE)では、超高真空下で、高度に制御された蒸発源により、原子の一層レベルの精度で蒸着することが可能である。作成された薄膜試料は、超高真空が保持された状態で搬送装置で分析装置に送られ、角度分解光電子分光、低速電子線回折、オージェ電子分光等により電子状態、原子構造等进行分析・評価する。同一試料を再び結晶作成室に戻し、さらに微量の原子を蒸着して、原子間距離や隣接原子数を変化させ、電子状態に対する量子サイズ効果を研究するのが目的である。

また光のエネルギーや偏光を変えて測定を行い、より多くの情報を得るため、物質構造科学研究所(筑波)放射光施設、分子科学研究所(岡崎)極端紫外光実験施設でのシンクロトン放射光を利用した共同利用実験を行っている。

さらに、世界最先端の放射光実験施設を仙台に建設し、放射光科学を推進する研究計画を進めている。



分子線結晶作成・光電子分光装置

表面物理グループ

Surface Physics Group

須藤 彰三 教授 坂本 一之 助手

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

本研究グループは、半導体・金属表面の数原子層に起こる物理現象、特に、表面の電子状態に興味を持ち研究を進めている。

固体表面では、固体中(バルク)とは異なった二次元的あるいは一次元的原子配列をとり、表面の電子や原子は表面特有の振る舞いをする。このことが表面の反応性、半導体素子の特性、結晶の成長など多様な基礎的・応用的問題を提示する。本研究グループでは、表面や界面の原子配列を制御・観察し、低次元構造に特有な電子状態や素励起(フォノン・プラズモン)の研究を行っている。

実験手段としては、高分解能電子エネルギー損失分光法(HREELS)、光電子分光法(PES)、表面の原子構造を観察できる走査トンネル顕微鏡(STM)が中心である。HREELSは低速電子が表面に敏感であることを利用し、超高真空中($\sim 10^{-9}$ Pa)で半導体や金属表面に1~300 eVの低速電子を入射させ、表面で反射する電子のエネルギー損失を測定する。PESでは、真空紫外光により表面固有の電子状態(表面準位)を観測するとともに、軟X線光により表面原子の内殻準位を測定する。表面原子の周期的配列や構成原子を評価するために、低速電子線回折(LEED)やオージェ電子分光法を用いている。さらに、表面上に形成されたナノ構造が表面全体やバルクの性質を決める場合もあることからHREELS、PESとSTMを組み合わせた複合測定も行っている。

具体的な研究テーマとしては、

1．表面に形成されたナノ構造の物性

結晶表面に吸着した原子や分子は、基板温度などの吸着条件や結晶の面方位に依存してひとりでに凝集し、原子・分子レベルの一次元ナノワイヤーや数十から数百個の原子や分子による三次元ナノクラスターを形成する。こ

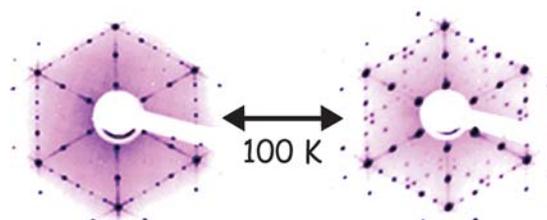
のような系に現れる低次元固有の電子状態や相転移などの物理的性質を研究している。

2．表面の原子・分子吸着、結晶成長の初期過程

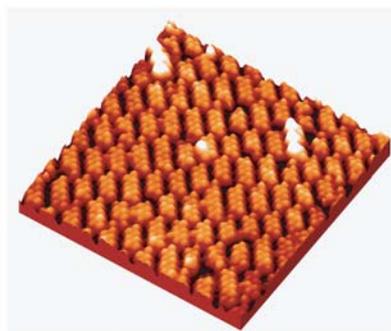
時間分解測定を行うことにより得た単結晶表面上への原子・分子の吸着・反応過程の詳細な情報は、表面上への原子・分子の選択的な配列を可能とするための基礎的実験であるとともに、結晶成長の初期過程での原子の反応性と表面のポテンシャルの相関についての知見をもたらす。

3．表面の素励起

表面プラズモン、表面フォノンのエネルギーおよびそれらの分散(波数依存性)は、表面のダイナミカルな電荷や結合状態に依存する。これらの素励起の観測を通して、表面の電子状態・構造を研究している。



Si表面上に形成されたAgナノワイヤーの相転移



自己組織化したPtシリサイド・ナノクラスター

レーザー分光物理グループ

Laser Spectroscopy Group

齊官 清四郎 教授 吉澤 雅幸 助教授 是枝 聡肇 助手

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

本研究室では、レーザー発信器及び非線形分光法に対して、量子エレクトロニクスの最新の技術を適用し、光物性における光学素過程の研究を行っている。この研究を通して、ガラスの低温物性、特に TLS(two level system) の実体及び光物性への影響を明らかにしたいと考えている。

これまでに明らかにした光学現象としては、光エコーにおける非マルコフ緩和の観測(平島)、共鳴蛍光による1-フォノン関数の導出(三上)、共鳴蛍光におけるハイトラ効果の観測(松田)、ラマン・ブリルアン散乱とボゾンピーク(三上)、結晶における準弾性光散乱の起源(是枝)、ファノ効果の偏光に依存した q 反転(松本)、レイリー・ブリルアン散乱と揺動散逸定理(大野)、フォノン共鳴とフォノン集束(大野、曾根原)等があり、最近では3-フォノン過程の研究に力を入れている。なぜなら、3-フォノン過程で説明されるマイクロ波超音波の減衰に TLS の影響が顕著に現れると考えているからである。また結晶におけるマイクロ波超音波の減衰率の温度特性と周波数特性に対する理論及び実験の結果は、これまで統一的でなく、未解決の問題となっている。この研究に有力な測定手段とな

る誘導ブリルアン散乱分光装置を最近完成(大野)した。

この高精度な分光装置は世界最高の分解能を持ち、3-フォノン過程の研究に威力を発揮するものと思われる。3-フォノン過程の研究において、熱フォノンの情報、特にその温度特性が不可欠であるが、熱誘起誘導レイリー散乱による測定方法も開発している(永野)。量子エレクトロニクスの研究分野の長年の夢として、kHz 分光法の開発があるが、そのための“光ビート分光法”の研究を開始し、また“comb generator”とよばれる周波数シフターと組み合わせた究極の分光法を完成させたいと考えている。

超高速分光法の研究(吉澤)では、励起状態の振動をフェムト秒の時間分解能で測定できるラマン分光装置を世界で初めて開発した。この装置を用いて光合成系のエネルギー移動における振動励起状態の役割を研究している。

これらの研究に加えて、フォトンエコー、ホールバーニング、電磁誘起透明化、AC シュタルク等、非線形光学の研究も継続して進めている。

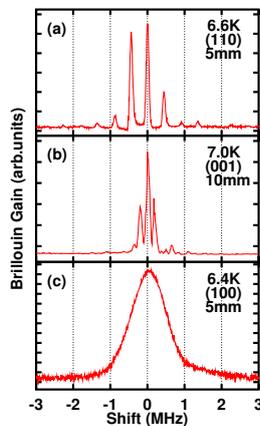


図1 定在波フォノンによるブリルアンスペクトルの分裂。結晶方位依存性からこの現象がフォノン集束と密接に関係していることが分かる。

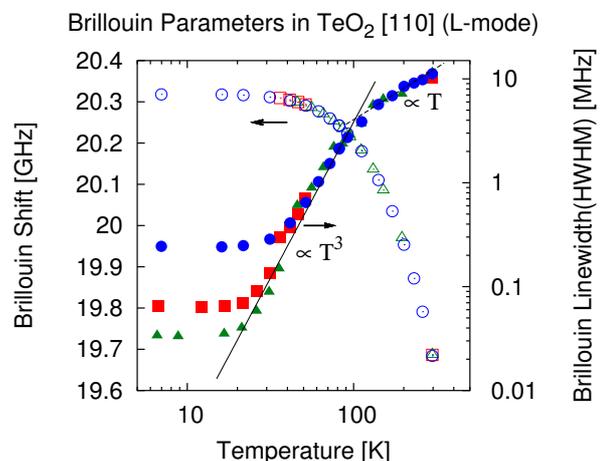


図2 TeO_2 結晶における誘導ブリルアン散乱の線幅とシフトの温度依存性。線幅の T^3 特性は Herring 過程と呼ばれている。

生物物理グループ

Biophysics Group

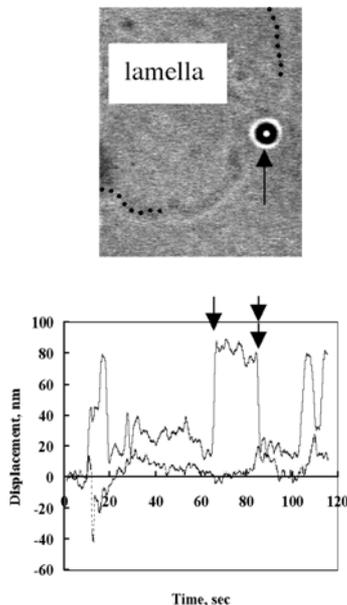
大木 和夫 教授 宮田 英威 助教授 大場 哲彦 助手

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

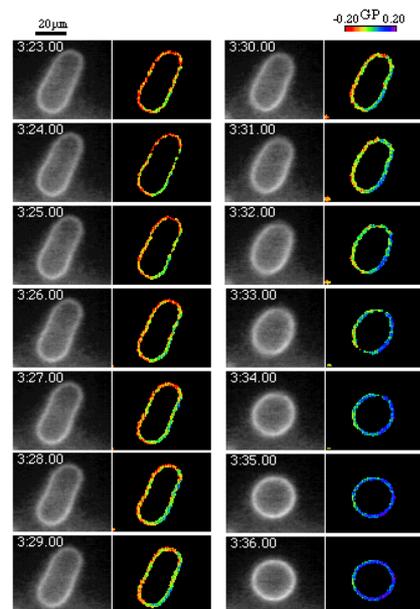
当研究室では、現在、物理学と生物学の境界領域である生物物理学の研究を進めている。その目的は生体物質や細胞に対して物理学の原理・法則を適用した実験的な研究を行うことにより、生命現象を解明することである。

地球上の生物は永い進化の歴史を内在した集積度および効率の高い有機的システムであり、細胞がその基本単位となっている。細胞は生体膜によって構築されている。そこで当研究室では「生体膜の構造・物性と機能の相関の解明」並びに「細胞活動の物理的機構解明」を2大研究テーマとして、生体物性学と細胞生物物理学の両面から研究を進めている。研究室には細胞の培養や生体膜を調製する設備があり、実験材料として、人工膜、生体膜、培養細胞、原生動物細胞などを用いている。物性の測定装置として、相転移・相分離物性を測定する高感度示差走査熱量計、デジタル密度計、分子運動や局所粘度、さらにイオン濃度や膜電

位などの測定が可能な偏光子内蔵型自動化分光蛍光光度計がある。生体膜上での脂質および蛋白質の拡散運動測定や細胞内での生体分子の動態観察には落射型蛍光顕微鏡、微分干渉顕微鏡、レーザー走査型共焦点顕微鏡などを使用している。各顕微鏡には冷却 CCD カメラ、イメージンテンシファイヤつきの CCD カメラ、或いは SIT カメラなどを目的に応じて装着し、細胞などの画像をビデオ記録する。蛍光2波長の分離観察が可能なユニットが人工膜や生体膜の膜流動性イメージングに用いられている。観察、記録された顕微鏡画像はワークステーション、パーソナルコンピュータを中心とした画像解析システムで処理する。さらに、一分子操作・観察可能な、光ピンセットを組み込んだエバネッセント波励起倒立型蛍光顕微鏡があり、細胞活動の物理的計測に用いられている。



光ピンセットによる細胞膜ダイナミックスの測定。(上)細胞にプローブのビーズ(矢印、直径1マイクロン)を光ピンセットで保持して接触させた様子。細胞膜の一部を黒点線で示す。(下)ビーズの重心位置の解析結果。膜の突出は矢印で、抗体は二重矢印で示す。



ジャイアントリポソームの相転移(降温)に伴う蛍光色素 Laurdan の蛍光顕微鏡画像(左)と膜流動性画像(右)。転移途中で、形状の変化と局所的な流動性変化が見える。

光物性物理グループ

Solid State Photophysics Group

石原照也 教授 岩井伸一郎 助教授 岩長祐伸 助手

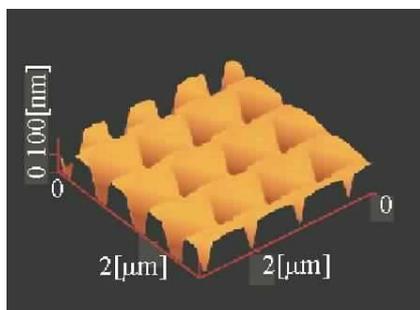
<http://sspp.phys.tohoku.ac.jp/>

光物性物理は固体物理学の一分野で、光と物質（半導体、絶縁体、金属）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物質系を対象に光をあてて新奇な物理現象を解明していきます。

1) フォトニック結晶

フォトニック結晶は物質を光の波長スケールで周期的に配列させたもので、1987年に提唱されて以来、多くの研究者を魅了してきました。このような系は自然界には殆ど存在しませんが、電子線描画装置などを用いたナノスケールの微細加工技術により、2次元構造であれば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。フォトニック結晶内では電磁場が自由空間とは異なった分布をし、半導体中の励起子や金属中のプラズモンといった素励起と相互作用して新しい現象を生み出します。

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フォトニック結晶に注目し試料の作製、レーザなどを用いた光学測定、数値計算の3本立てで未知の物理現象に取り組んでいます。特に非線形光学応答や非局所光学応答の物理について、我々のアプローチにより新しい研究の流れを開拓してゆきます。

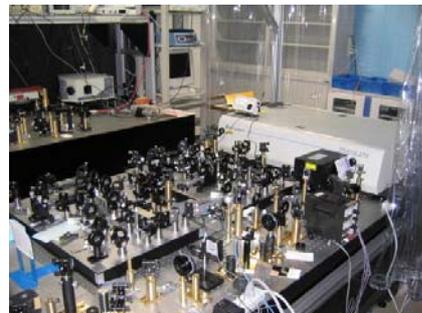


作製した構造の原子間力顕微鏡写真

2) 強相関電子系における超高速光励起協同現象の探索

III-V族あるいはII-VI族半導体など、バンド理論によって電子状態が記述できる無機物質やそのナノ構造体における光応答に関する研究は幅広く行われ、多くの超高速現象や、コヒーレント過渡現象が見出されています。その一部は、現在の超高速光-電子デバイスの礎となっています。それに対し、電子やスピンの多体的な相互作用が無視できない系（強相関電子系）における光物性やその光機能の探索は始まったばかりです。これらの系では、温度、圧力の変化や、キャリアドープによって絶縁体-金属-超伝導転移など多くの興味深い現象が起ることが知られ、光応答においても、様々な「激しく」「速く」「面白い」超高速協同現象が期待されています。

我々の研究グループでは、パルス幅20 - 100フェムト(10^{-15})秒程度の超短パルスレーザーを用い、光励起状態のエネルギー緩和や位相緩和、あるいは、光励起によって物質の電子的な性質が変化する「光誘起相転移」の超高速ダイナミクスの研究を行います。そのために、遷移金属化合物のモット絶縁体や有機電荷整列系、有機電荷移動錯体などを対象に、温度、圧力などを変化させて、超高速時間分解測定を行います。光誘起協同現象における励起状態の干渉効果による制御（コヒーレントコントロール）にも挑みます。



実験に使用する超高速レーザ分光装置

格子欠陥・ナノ構造物性グループ

Lattice Defect Physics Group

米永 一郎 助教授

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

結晶の特徴は原子が周期的に規則正しく配列していることであるが、我々が実際に手にする結晶は、多かれ少なかれサブナノスケールで原子配列の乱れを伴う特有な構造、即ち格子欠陥を含む。格子欠陥には点欠陥、転位、積層欠陥、析出物、それらが複合したナノ構造体等、多くのものがある。格子欠陥は結晶、特に半導体の性質を左右する。半導体の重要な物性、例えば電気伝導、発光などが構造に敏感なためである。半導体ではこれらの格子欠陥を有害として排除するにせよ、逆に新機能の源として有効に利用するにせよ、格子欠陥とつきあわねばならず、その性質と構造を解明することは非常に重要な課題である。

本研究グループは、Si、GaN、ZnSe等の最先端の半導体について、これらの格子欠陥を様々な方法によって、“性質を調べる”、“構造を見る”、“成因と発生の物理を明らかにする”、“構造を制御し、新しい物性として創成する”研究を行っている。

1) 格子欠陥の電気・光学的性質の解明：半導体中の格子欠陥の周囲では特有の電子状態が誘起される。半導体デバイスのポテンシャルを展開するためにはその特有な状態を電気・光学、発光学、電磁学的方法で測定し、原子構造と成因を解明し、さらに形成される過程を明らかにすることが必要である。それが新機能のナノ構造体を創成する基礎知識となる。フォトルミネッセンス、光吸収、電子スピン共鳴、ホール効果等の装置を用いて研究を行っている。

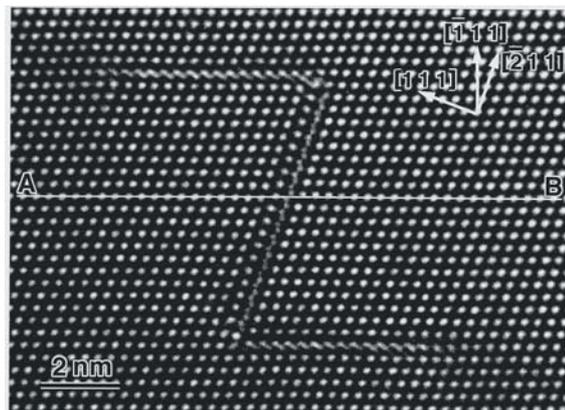
2) 転位の発生と運動の解明：線状欠陥である転位は半導体デバイスの性能を劣化させる

原因と考えられ、転位の発生や活動の抑制が期待されている。そのためには転位の発生と運動に関して、個々の転位のミクロな運動と構造を観察し、他の欠陥の影響を含めた運動過程の物理を明らかにすることが必要である。実験装置は、転位の運動挙動を測定するインストロン型変形装置、個々の転位の運動を観察する超強力X線装置、電子顕微鏡等である。

3) 格子欠陥の観察法の開発：サブナノスケールの格子欠陥の性質と構造を精確に測定し、観察するための原理と装置の開発を進める。

4) 次世代半導体結晶の開発：現在の半導体を越えた、次世代の環境調和、省エネルギー半導体結晶を予測し、人工合成・育成し、さらに格子欠陥・ナノ構造体による新機能の創成を行う。

尚、本年度博士前期課程を受験する大学院生のこのグループへの配属はできない。



GaAs 中の Z 型転位欠陥の原子スケール像

結晶成長物理グループ

Crystal Growth Physics Group

中嶋 一雄 教授 宇佐美 徳隆 助教授

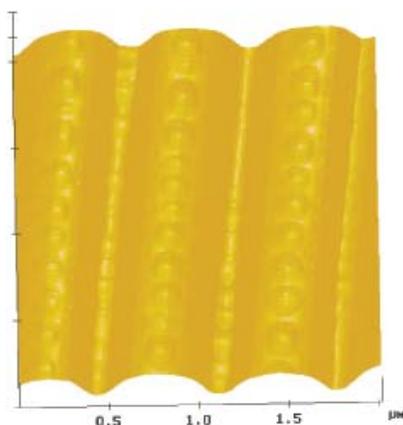
佐崎 元 講師 藤原 航三 助手

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

クリーン・エネルギーの開発、次世代を担う電子産業基盤の構築、医薬品・食品などのバイオテクノロジーの展開といった21世紀の重要課題を解決する技術として、太陽電池に代表される光電変換素子、半導体レーザやULSIに代表される光・電子デバイス、タンパク質に代表される生体高分子の三次元構造解析があります。これらはすべて結晶を基礎としており、新しい物性や機能を有する結晶を創製できる成長技術の開発が課題解決の鍵を握っています。当研究室では、半導体結晶から有機結晶までを対象とし、実験と理論により結晶成長メカニズムを解明し、これらの結晶物理学に基づいて新しい結晶成長技術の開発と新結晶の創製を行うことを目指しています。このため、成長メカニズム解明の専用装置を考案し、これにより得られた知見に基づき、新しい結晶成長装置を考案・導入し、独自の結晶を成長するといった特徴ある研究を行っています。現在、主に以下の研究テーマに取り組んでいます。

1. 太陽電池用結晶の研究

- ・キャスト成長炉によるSi多結晶の結晶方位の整列、粒界性質の制御成長法の研究開発



(a) Siパターン基板を利用したGeドットの二次元配列。

- ・組成分布を有するSiGe多結晶やGeドット/Si構造の成長と高効率太陽電池への挑戦

- ・キャスト法およびフローティングゾーン法による粒方位のそろった超高品質Si多結晶の成長

2. 多元系バルク基板結晶の成長と、歪み制御ヘテロエピタキシャル構造の研究

- ・固液界面温度制御法&フローティングゾーン法による均一組成のSiGeバルク単結晶の成長

- ・SiGeの歪み制御高品質エピタキシャル結晶の成長とヘテロ構造物性

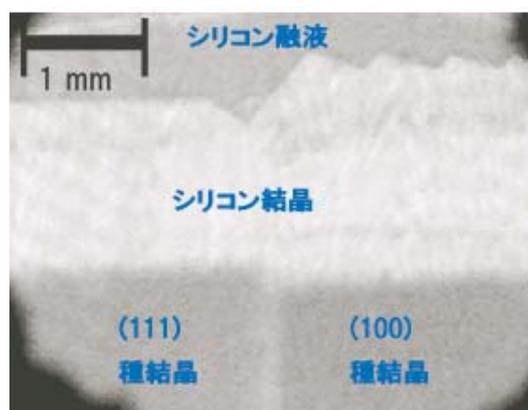
3. 結晶成長メカニズムの研究

- ・in situ Si融液成長過程観察技術の開発及び成長初期メカニズムの解明

4. 有機材料の結晶成長の研究

- ・基板改質法による有機半導体薄膜の高配向エピタキシャル結晶成長

- ・タンパク質結晶成長素過程の分子レベルその場観察と格子欠陥発生機構の解明



(b) 融液成長しているSi結晶の界面形状のその場観察

量子表面界面科学グループ

Surface/interface Science Group

櫻井 利夫 教授 長尾 忠昭 助教授

藤川 安仁 助手 Sadowski, J.T. 助手 高村 (山田) 由紀子 助手

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

当研究室は表面・界面研究の種々のプロジェクトに積極的に参画し、世界最先端の成果を挙げてきた(世界のベスト 10 研究グループの一つ (Science Watch 誌、1995 年 10 月号))。研究方針は、固体表面・界面の研究に有用な新手法の開発とそれを用いた先端機能材料の基礎物性の解明と要約できる。プロジェクト 1. 走査プローブ顕微鏡による表面・界面の電子状態の微視的研究

独自に開発した 6 台の汎用型高性能 FI-STM(電界イオン・走査トンネル顕微鏡)を常時稼働させ、半導体・金属・有機分子あるいはこれらのヘテロ層の成長ダイナミクスと物性研究を進めている。当研究室が世界に先駆けたフラレン研究は現在フッ化フラレンの研究へと展開している。また、新たに導入した高温 STM を用い、半導体表面のフッ素エッチングの原子レベル研究にも着手している。汎用型 FI-STM の一台は prototype MBE (分子線エピタキシー)装置と組み合わせ MBE-STM 装置として完成させ、MBE 成長させた GaAs 及び GaN の表面構造解析を行い、これらの成果は高く評価され多くの国際会議で招待講演として発表された。最近では、シリコン表面での窒化物ナノ構造形成の研究や、さらに、巨大磁気抵抗、熱電素子材料としても注目されている半金属 Bi 超薄膜などの成長・相転移ダイナミクスの研究も進めている。

プロジェクト 2. アトム・プローブ及び TEM による機能材料の超微細組織解析

アトムプローブと電子顕微鏡を用いて合金の相変態に関する研究や種々の実用金属材料のナノスケール解析を進めており、世界的に第一級のものとして認められている (Science 誌 266,1178(1994))。受賞としては Acta Metall. Mater. に発表された FINEMET の形成過程研究の“最優秀論文賞”受賞、三次元アトムプローブによる磁性薄膜の定量的観察の日本金属学会“金属組織写真賞”受賞などがある。プロジェクト 3. エネルギー分析型低速電子回折法による低次元電荷ダイナミクスの研究

従来の HREELS(高分解電子エネルギー損失分光装置)に比べ、1 桁以上高い波数分解能をもつ、新型のエネルギー損失分光-低速電子回折装置を用いて、固体表面界面に形成される低

次元電子系のダイナミクスを研究している。例えば、半導体表面上に作成した、単一金属原子層内に閉じ込められた電子プラズマの振動数の波数依存性(プラズモン分散)を測定し、低次元高密度縮退電子系としては、世界で初めてのプラズモン分散の測定に成功した。さらに、フォノン散乱、不純物散乱以外の未知の減衰プロセスがあることも見出し、この減衰過程に量子液体としての特徴が発現していることも見出した。

最近の発表成果

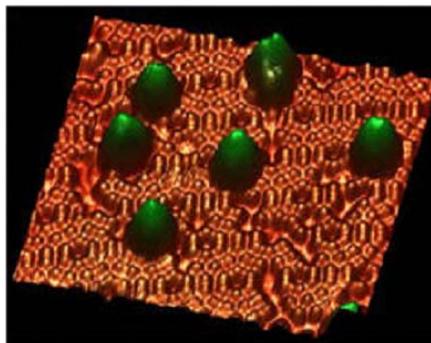
1.T. Hashizume, et al. "Structure of As-rich GaAs(001)-(2x4) and c(4x4) reconstructions," *Phys. Rev. Lett.* **73**, 2208 (1994).

2.Q.K. Xue, T. Hashizume, J.M. Zhou, T. Sakata, T. Ohno, and T. Sakurai, "Structures of GaAs(001) Ga-rich 4x2 and 4x6 reconstructions," *Phys. Rev. Lett.* **74**, 3177-3180 (1995).

3.Q.K. Xue, Q.Z. Xue, R.Z. Bakhtizin, Y. Hasegawa, I.S.T. Tson, T. Sakurai, and T. Ohno, "Structures of GaN(0001)2x2, 4x4 and 5x5 Surface Reconstructions," *Phys. Rev. Lett.* **82**, 3074-3077 (1999). *Phys. Rev. Lett.* **84**, 4015 (2000).

4.T. Nagao, et al. "Dispersion and Damping of a Two-Dimensional Plasmon in a Metallic Surface-State Band," *Phys. Rev. Lett.*, **86**, 5747 (2001).

5.Y. Fujikawa, et al. "Origin of the Stability of Ge(105) on Si: A New Structure Model and Surface Strain Relaxation," *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 176101 (2002).



Si(111)-7x7 上に吸着した C₆₀F₄₆

固体イオン物理グループ

Solid State Ion Physics Group

河村 純一 教授 柴田 行男 助教授 神嶋 修 助手

<http://www.ssip.rism.tohoku.ac.jp/index.html>

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、燃料電池、マイクロ電池、環境センサー、水素・酸素製造装置などの研究も進んでいる。当研究室では、光・電子・イオンの相互作用について研究し、固体内での速いイオンの動きをレーザー分光や核磁気共鳴(NMR)などを用いて計測する手法を開発している。

1) サイト選択分光やホールバーニング分光による固体内イオンダイナミクスの研究

超イオン導電体内のイオンダイナミクスの物理に、それ自身が持っている不規則性がどの様に関わっているかを明らかにするため希土類イオン等の光学中心をプローブとする、狭帯域レーザーを使ったサイト選択分光やホールバーニング分光等の高分解能分光法の手法を用いて研究を行っている。

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、時間軸をもとにし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。特に、超イオン導電体やガラスに特徴的な低励起モードとイオン拡散、格子振動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

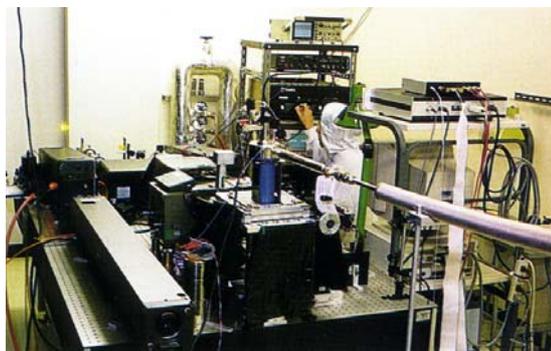
原子核の持つ核スピンをラベルとして用い、固体内でのイオンの移動を核磁気共鳴(NMR)法により計測する。特に、NMRホールバーニングや多次元NMRを用いたイオン移動速度の決定や、強力なパルス磁場勾配を用いたマイクロイメージングと拡散係数測定法の開発を行っている。

4) ナノ構造ガラスの作成とイオン伝導機構の解明

超イオン伝導性を示すガラス・アモルファス固体には、数 nm のクラスター構造を持つ物質やナノ微結晶、ナノ分相構造を特徴とする物質が多い。これらの物質の構造とイオン伝導機構を解明するため、X線・中性子線回折、EXAFS、NMR、交流伝導度などの測定を行っている。

5) イオン伝導体薄膜・人工格子の作成と界面イオン移動の研究

固体・固体界面でのイオン移動を研究するために、レーザーアブレーション法を用いて、超イオン導電体の薄膜や人工超格子を作成し、その構造や電子状態とイオンダイナミクスの関係を、インピーダンス特性、ラマン散乱、赤外吸収などの手法で調べている。



レーザー・ホールバーニング実験装置



パルス磁場勾配 NMR 装置

強相関固体物性グループ

Correlated-electron Solid State Physics Group

有馬孝尚 教授

伊師 君弘 助手

1. 反転対称の破れた磁性体における不斉磁気光学

反転対称心を持たない磁性体（磁性誘電体、磁性半導体、キラル磁性体など）は通常の磁性体とは異なる新規の磁気光学効果を示すことが予測され、実証されつつあります。この新規磁気光学効果は、結晶の対称性が電磁波との相互作用にどのような影響を及ぼすのかというという学術的な見地からも興味を持たれますが、生体中の磁性の検出や巨大磁気抵抗素子などに用いられる磁性超格子の磁化研究など実際の応用につながる可能性もあります。そこで、私たちはこの新規磁気光学効果を赤外・可視・紫外・X線の各エネルギー領域において検出する技術を開発しています。また、その微視的な過程の解明も進めています。

2. 磁性誘電体の物質設計と物性研究

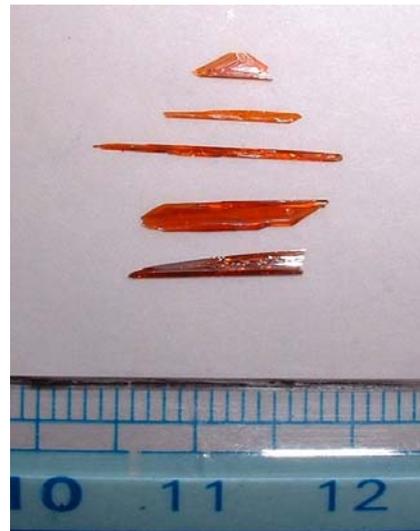
通常、強誘電体の電気分極は外部電場で、強磁性体の磁化は外部磁場で、それぞれ制御されます。しかし、磁性と誘電性を併せ持つ一部の物質では外部電場によって磁化を変化させたり外部磁場によって電場を変化させたりすることができます。このような効果を電気磁気効果と呼びます。この効果は、固体中の電子に内在する相対論的效果が顕に顔を出したものです。理論的に非常に興味深いとともに、高密度記録材料や演算素子開発の視点からも注目を集めつつあります。

2003年度、私たちは他研究機関と共同で、ある種のマンガン酸化物が非常に大きな電気磁気効果を有することを発見しました。現在は、この巨大電気磁気効果の発現機構を解明するとともに、さらに大きな電気磁気効果を有する物質の開発を目指して研究を行っています。

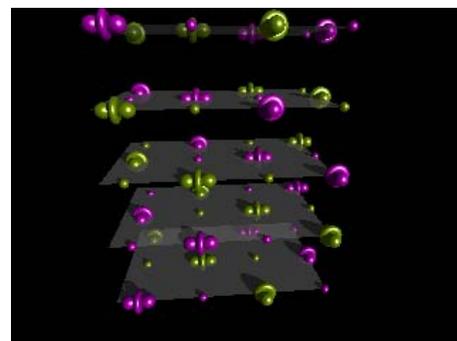
3. 強相関固体における電子の規則的配列や軌道占有の交替現象の研究

遷移金属の化合物ではしばしば電子間の相互作用と電子の運動エネルギーの拮抗が生じます。このような物質に対して温度の小さな変化や少しの外場を加えることで、両者のバランスを変化させることができます。その結果、金属

状態と絶縁体状態の間を行き来して電気抵抗が大きく変化するのです。このような物質では、主に絶縁体状態において電子間の相互作用が勝っている場合に、電子の規則的な配列や軌道占有の交替といった特異な状態が見られることがあります。我々は、軌道放射X線やパルス中性子線を利用してこのような電荷や軌道の整列を観察することにより、金属絶縁体転移の微視的機構を明らかにするための研究を行っています。



化学気相輸送法で作製した単結晶



TbBaMn₂O₆ の $3d_{\gamma}$ 電子の規則配列。色の違いでスピンの up, down を示す。

電子線ナノ物理グループ

Electron-Crystallography and -Spectroscopy Group

寺内 正己 教授 津田 健治 助教授

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

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のみ可能となります。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 $\text{meV} \sim 1000 \text{ eV}$ 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、電子ナノビームを用いた局所構造解析および局所電子状態解析のための世界最先端の装置開発および解析手法の開発と、その物性物理学への応用を行っています。これまでに、世界最高の分解能 12meV を誇る超高分解能電子エネルギー損失分光装置、および世界初の精密構造解析用分光型電子顕微鏡の開発に成功しました。また、最近新たに世界初の電子顕微鏡用軟 X 線分光装置の開発に取り組んでいます。

現在、次のようなテーマについて研究を行っています。

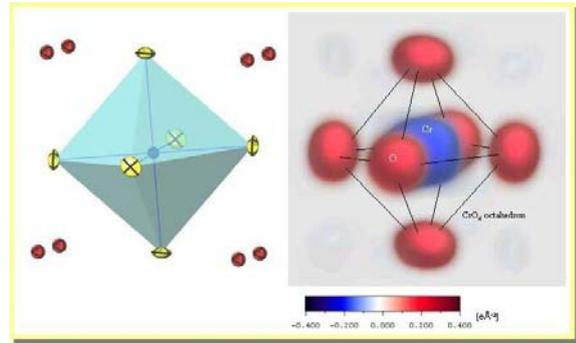
- (1) C_{60} 、ナノチューブ (フラレン) やボロン化合物の電子状態の研究
- (2) ナノスケールの精密構造解析法 (装置および解析ソフトウェア) の開発
- (3) 準結晶など非周期 (高次元) 物質の構造および電子構造 (擬ギャップ構造) の研究
- (4) 銅酸化物高温超伝導体、マンガン酸化物など強相関電子系物質の結晶構造・電子密度分布

および電子状態の研究

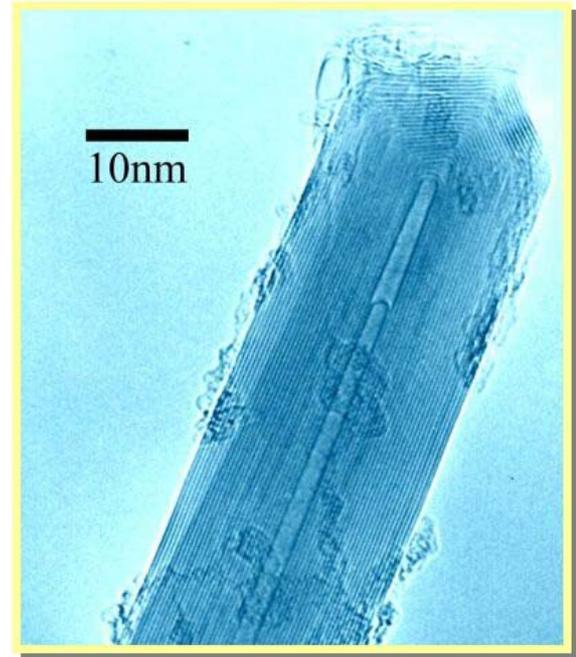
(5) 強誘電体における構造相転移および電子状態の研究

(6) 半導体、人工超格子、量子井戸等における格子欠陥および界面構造の研究

詳しくは研究室の web page (<http://xes.tagen.tohoku.ac.jp/>) を見て下さい。



収束電子回折法で決定した LaCrO_3 の結晶構造と変形電子密度分布



多層カーボンナノチューブの超高分解能電子顕微鏡像

結晶構造物性グループ

Structural Physics and Crystal Physics Group

野田 幸男 教授 渡邊 真史 助手 木村 宏之 助手

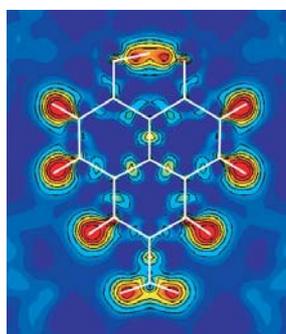
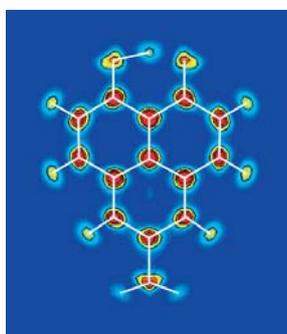
<http://www.tagen.tohoku.ac.jp/labo/noda/index-j.html>

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 \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、皆さんが日頃使うガス着火装置の中の圧電素子、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ことや、超伝導などの未来の物質の探索、さらには地震機構の解明などともつながっています。結晶中の原子や電子の分布を知る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 線回折装置が揃っており、これからも新しい装置を開発していきます。現在、4K で X 線写真がとれて構造解析が出来る装置を作っています。また、放射光施設 SPring-8 の 4 軸 X 線回折装置や日本原子力研究所・東海 3 号炉の 4 軸中性子線回折装置も私たちが中心になって立ち上げ、他では出来ないユニークな実験が可能となっています。

・研究室の主要研究テーマ

- (1) 放射光施設 (SPring-8, Photon Factory)、中性子線施設 (JRR3M)、実験室での実験手法・新しい装置の開発。
- (2) 極端条件(高圧、高磁場、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。



MeHPLN という物質の構造。左は中性子線回折実験から得られた原子核密度分布、右は X 線回折実験から得られた結合電子や水素結合中の水素の電子分布。水素結合中に大きな電子分極があるのが直接見えている。

レーザー量子光学グループ

Laser Quantum Optic Group

瀬川 勇三郎 教授*(客員) 張 保平 助教授(客員) 川瀬 晃道 助教授(客員)

<http://www.phys.tohoku.ac.jp/shoukai/lazer-q.html>

1. 研究内容

(1) イオン結晶あるいは半導体量子構造の作製及びその光学的性質に関する研究を行い、光と物質との相互作用を理解し、光機能素子に応用する事を目指している。通常、物質を光を用いて観察した時、その光学的特徴は、電子構造で基本的に定まってしまい、それは材料の固有性質として観測される。しかし、物質のサイズを、電子のドブロイ波長程度(数十~数ナノメートル)にすると、電子構造の変化に伴う新しい光学的特徴が見られ始め、光コンピューターのような高速演算に必要な光非線形効果が強められると期待されている。これは電子の量子閉じ込め効果と呼ばれ、物質の光学的性質を人為的に制御する方法として、最近盛んに研究が行われている。このような量子閉じ込め効果を調べるため、当研究室では先ず、イオン結晶やII-VI族化合物半導体の結晶成長と、その形状やサイズを制御して、量子井戸、量子細線、量子ドット等の量子構造を、分子線エピタキシー(MBE)法で作製する技術の開発を行ってきた。例えば、MgO(001)基板上でのCuCl等のイオン結晶や、GaAs基板上でのZnCdSe等のII-VI族半導体量子構造の作製を行っている。これまでにCuClの成長メカニズムの解明、ZnCdSe等の量子構造の作製を行ってきた。また、このようなナノメートルの量子構造を評価するため、原子間力顕微鏡(AFM)、顕微分光法、近接場走査型光学顕微鏡(NSOM)等の装置を開発し、1ミクロンから0.1ミクロンの微小領域での光学測定を極低温で行っている。最近単一ZnCdSe量子ドットからの発光が観測され、更にその光学的性質について研究を重ねている。さらに波長可変短パルスレーザーを用いた、2光子励起、4波混合等の非線形分光法も活用し、いろいろな量子閉じ込め効果の解明を目指し、これらの量子構造の新しい光機能素子への応用の可能性を探している。

(2) 高温超伝導体の発見以来、酸化物の製作法の研究が急速に進歩した。この進歩を受けて、ZnOを中心とする、酸化物半導体の研究を行っている。当研究室ではこれら酸化物及びそのナノ構造と量子構造を作成し、フォトルミネッセンス、吸収・反射、励起スペクトル及び

ピコ秒過渡現象測定装置を用いて調べ、紫外半導体レーザーの実用化の可能性を追求している。

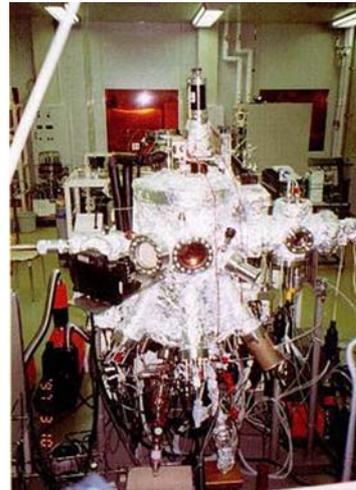
(3) 光バンドギャップを持つフォトリック結晶に関する研究を行っている。光を、光の波長と同程度の周期構造の中に入れると、光の存在を制御する事が可能になる。つまり、ある周期構造の中では、ある特定の波長の光は存在出来ず、励起された原子は、この波長の発光でエネルギーを放出する事が出来なくなり、光の自然放出過程の制御が可能になる事が理論的に予測されている。当研究室は可視光の波長0.5ミクロン程度またはそれ以下の3次元周期構造を作製し、物質の形状制御と、光の3次元周期構造による制御を組み合わせ、新しい光学素子の開発を目指している。

2. 研究手法

光物性上興味がある物質の作製方法を開発し、その光学的性質を調べ、光機能性材料としての応用の可能性を探る。

3. 主な設備

- (1) 分子線エピタキシー(MBE)結晶成長装置
- (2) 金属有機化学気相エピタキシー(MOCVD)結晶成長装置
- (3) ピコ秒過渡現象測定装置
- (4) 顕微分光測定装置
- (5) 低温近接場走査型光学顕微鏡(NSOM)
- (6) 各種レーザー



分子線エピタキシー(MBE)結晶成長装置

(注)今年度学生の募集はしない。



理学総合棟



物理 B 棟 (説明会会場), 物理 A 棟 (一番奥)



青葉山キャンパス航空写真



理学研究科地区鳥瞰図



理学研究科は青葉山キャンパス北半分



仙台駅乗り場案内

交通: 仙台駅西口 バス 9 番乗り場から仙台市営バス (所要時間 20 分、運賃 220 円)
 青葉城址循環線 (青葉通・理・工学部先回り) 理学部自然史標本館前下車 または
 宮教大・青葉線 (青葉通り・工学部経由) 情報科学研究科前下車 徒歩 5 分

(写真、図は東北大 Web, 理学研究科 Web から許可を得て転載)

東北大学大学院理学研究科物理学専攻 案内

発行: 2004年5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
東北大学大学院理学研究科物理学専攻
物理系専攻共通事務室

電話: 022-217-6494

ファックス: 022-217-6498

電子メール: kyomu@mail.phys.tohoku.ac.jp

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