

# 中性子科学研究施設

## Neutron Science Laboratory

中性子は透過力に優れ、微小磁石の性質をもつので、原子の中心にある原子核やその周りにおける電子のつくる磁場と力を及ぼし合う。この性質を利用して物質による中性子の散乱のされ方を測定し、物質内の原子や磁気モーメントの配列や運動の様子を知る実験方法を「中性子散乱」という。物性研究所の中性子科学研究施設では主に日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3 に設置された分光器を用いて、中性子散乱実験による物性研究のための全国共同利用を推進してきた。さらに、2009 年に本格稼働した大強度陽子加速器施設 J-PARC においては、最新のチョッパー型分光器 HRC を用いた共同利用の推進を行っている。当施設が実施する全国共同利用により、超伝導体、重い電子系、トポロジカル物質、マルチフェロイック物質、新規量子相などの固体物理研究をはじめとして、ガラスなど複雑凝縮系、イオン伝導体などの材料科学、高分子やゲルなどのソフトマター、生体関連物質まで幅広い物質科学の研究が中性子散乱を用いて行われている。また、当施設は日米協力事業「中性子散乱分野」の実施機関としても活動し、我が国の中性子散乱研究の発展に貢献している。

A neutron has excellent transparency of matter and a nuclear magnetic moment. Owing to these properties, neutron scattering is a powerful method to investigate the structure and dynamics of atoms and electron spins in condensed matter. Since 1961, the Neutron Science Laboratory (NSL) has been playing a central role in neutron scattering activities in Japan not only by performing its own research but also by providing a general user program using the university-owned 12 neutron scattering spectrometers installed at the research reactor JRR-3 (20 MW), JAEA (Tokai, Ibaraki). Furthermore, NSL owns state-of-art inelastic neutron scattering spectrometer HRC in J-PARC, which started its operation in 2009. Major research areas supported by the NSL user program are solid state physics (strongly correlated electron systems, superconductors, heavy fermion systems, topological materials, multiferroic materials, novel quantum phases etc.), soft matter (polymers, gels, membranes etc.), complex systems (glass, liquid, clathrate materials, etc.), material science (ionic conductors, hydrogen systems etc.), biological physics, and neutron optics. The NSL also operates the US-Japan cooperative program on neutron scattering since 1984.

教授 (施設長)  
Professor (Director)

山室 修  
YAMAMURO, Osamu

助教  
Research Associate

李 响  
LI, Xiang

技術専門職員  
Technical Associate

浅見 俊夫  
ASAMI, Toshio

准教授  
Associate Professor

益田 隆嗣  
MASUDA, Takatsugu

助教  
Research Associate

浅井 晋一郎  
ASAI, Shinichiro

技術専門職員  
Technical Associate

杉浦 良介  
SUGIURA, Ryosuke

准教授  
Associate Professor

中島 多朗  
NAKAJIMA, Taro

助教  
Research Associate

秋葉 宙  
AKIBA, Hiroshi

技術専門職員  
Technical Associate

川名 大地  
KAWANA, Daichi

教授 (客員)  
Visiting Professor

田中 秀数  
TANAKA, Hidekazu

助教  
Research Associate

齋藤 開  
SAITO, Hiraku

特任研究員  
Project Researcher

大政 義典  
OHMASA, Yoshinori

特任研究員  
Project Researcher

水野 勇希  
MIZUNO, Yuki

特任研究員  
Project Researcher

山根 峻  
YAMANE, Ryo



日本原子力研究開発機構 (JAEA) の研究炉 JRR-3 の炉室に設置された 3 台の大学所有の 3 軸分光器 (4G, 5G, 6G)。これ以外にガイドホールで所有する様々なタイプの 9 台の中性子分光器を用いて、研究室の独自研究と全国共同利用を行っている。

The university-owned 3 triple-axis spectrometers (4G, 5G, 6G) installed in the reactor hall of the research reactor JRR-3 of Japan Atomic Energy Agency (JAEA). Using these and 9 various types of spectrometers installed in the guide hall, we are performing our own research and general user program.

# 山室研究室

Yamamuro Group



山室 修  
YAMAMURO, Osamu  
教授  
Professor

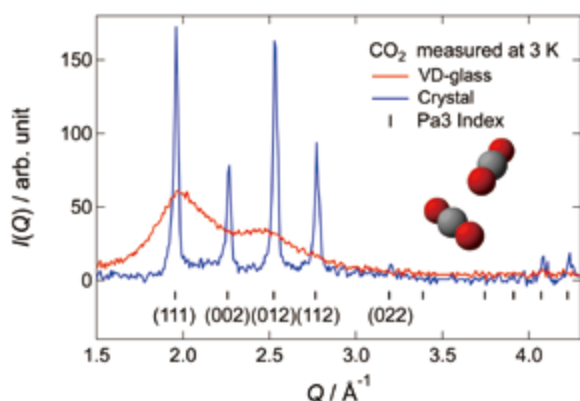


秋葉 宙  
AKIBA, Hiroshi  
助教  
Research Associate



李 响  
LI, Xiang  
助教  
Research Associate

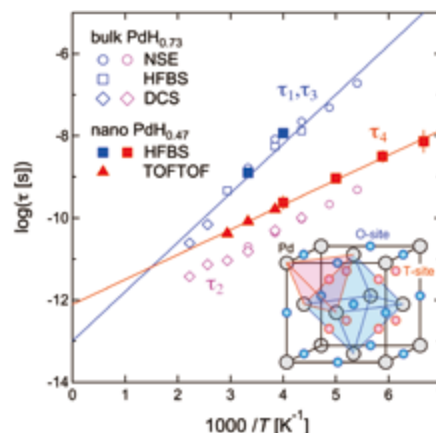
本研究室では複雑凝縮系の化学物理を研究している。現在の主な対象は、ガラス・過冷却液体、水およびその関連物質、イオン液体、水素吸蔵金属ナノ粒子である。ガラス転移は液体が構造変化を起こさずに固化する不思議な現象であり、物性物理学の長年の大問題の一つである。水は最も身近な物質の一つであるが、水素結合が織りなす様々な特異物性を示す。イオン液体では、静電力とファンデルワールス力の競合から、ナノドメイン構造や階層的ダイナミクスが現れる。金属ナノ粒子中の水素原子は、表面効果によりポテンシャル面が歪められるため、バルクでは見られない特異な構造やダイナミクスを示す。これらの物質に対して、中性子散乱、X線回折、熱容量、誘電緩和などを測定し、構造・ダイナミクス・熱力学の3視点から、複雑な物質に内在する単純(?)な法則を明らかにすることを目指している。



蒸着 CO<sub>2</sub> ガラス (赤線) と結晶 (青線) の X 線回折パターン。二体分布関数解析から、CO<sub>2</sub> 分子はガラスと結晶の両方で図のような最近接分子間配置をとることが分かった。

X-ray diffraction patterns of the vapor-deposited glass (red curve) and crystal (blue curve) of CO<sub>2</sub>. The pair-distribution function analyses revealed that the nearest-neighbor configuration of CO<sub>2</sub> molecules is as shown in the figure for both glassy and crystalline states.

We are studying chemical physics of complex condensed matters, especially glasses and supercooled liquids, water and related materials, ionic liquids, and nanoparticles of hydrogen storage metals. Glass transition is a mysterious phenomenon in which liquids solidify without structural change. This is one of the big and long-standing issues in physics. Water, which is the most familiar material for us, exhibits various unique phenomena caused by hydrogen bonds. Ionic liquids have nanometer-size domains and hierarchical dynamics generated by competing electrostatic and van der Waals interactions. Hydrogen atoms in metal nanoparticles give rise to unusual structure and dynamics caused by the surface effects and resultant distorted potential energy surfaces. These substances are investigated by neutron scattering, x-ray diffraction, heat capacity, and dielectric measurements. Our aim is to find simple (?) rules involved in complex systems from the three different points of view, i.e., structure, dynamics, and thermodynamic.



バルクおよびナノ粒子パラジウム水素化物のアレニウスプロット。これらの緩和時間は4台の分光器による中性子弾性散乱により決定された。緩和のQ依存性から、τ<sub>1</sub>、τ<sub>2</sub>、τ<sub>3</sub>はOサイト、τ<sub>4</sub>はTサイトのH原子の拡散によることが分かった。

Arrhenius plots of bulk and nanoparticles of palladium hydrides. These relaxation times were determined by the QENS experiments with 4 spectrometers. The Q dependence of the relaxation clarified that τ<sub>1</sub>, τ<sub>2</sub> and τ<sub>3</sub> correspond to the H atomic diffusion at the O-sites while τ<sub>4</sub> at the T-sites.

## 研究テーマ Research Subjects

1. ガラス転移、ボゾンピークなどの不規則凝縮系のダイナミクス  
Dynamics of disordered condensed systems, such as glass transitions and boson peaks
2. 水および関連物質 (含水多孔性結晶など) の構造とダイナミクス  
Structure and dynamics of water and related materials such as hydrated porous crystals
3. イオン液体の熱力学的性質とダイナミクス  
Thermal and dynamical properties of ionic liquids
4. 水素吸蔵金属ナノ粒子の構造とダイナミクス  
Structural and dynamical properties of nanoparticles of hydrogen storage metals

# 益田研究室

Masuda Group



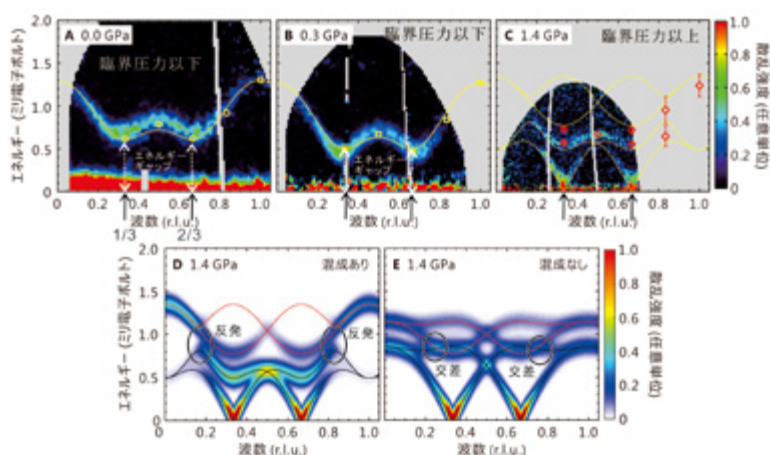
益田 隆嗣  
MASUDA, Takatsugu  
准教授  
Associate Professor



浅井 晋一郎  
ASAI, Shinichiro  
助教  
Research Associate

本研究室は、低次元スピン系やフラストレーション系などにおける新しい量子現象・量子状態を実験的に発見することを目指している。強い量子性や幾何学的フラストレーションは、自明な古典的秩序状態を阻害し量子状態が基底状態となる上に、小さな摂動に敏感なため、低次元スピン系やフラストレーション系は量子現象開拓のフロンティアとなっている。我々は、スピン液体、RVB、キューボック構造等、新しい磁気状態の研究と、マルチフェロイック系やリラクサー磁性体などにおける、新しい電気磁気効果の研究を行っている。最近の我々の研究例として、フラストレート量子磁性体 CsFeCl<sub>3</sub> の圧力下スピン・ダイナミクスを、中性子非弾性散乱実験と拡張スピン波理論で調べた結果を図に示す。低圧力のスピン無秩序状態においては1本の一重項-二重項励起が観測されるのに対し、1.4GPaの秩序相においては複数のモードが観測された。理論計算との比較により、南部・ゴールドストーンモードとHiggs 振幅モードの新しい混成モードの存在が明らかとなった。

One of the research goals in our group is to find a novel quantum phenomenon and to reveal its mechanism in low-dimensional spin magnets and frustrated magnets. Strong quantum fluctuation or geometrical frustration disturbs the development of trivial magnetic states and induces a non-trivial quantum state. Furthermore, such a state is sensitive to a small perturbation and, thus, the area is frontier of quantum phenomena. Our research topic includes spin liquid, RVB, Cuboc structure, etc. Another goal is to observe a new magnetoelectric effect in multiferroic compounds and/or relaxor magnets. Figures show the experiment and calculation of the pressure variations of the spin dynamics in the frustrated quantum magnet CsFeCl<sub>3</sub>. In the disordered phase at low pressures single mode of singlet – doublet excitation is observed. In contrast, in the pressured induced ordered phase at 1.4 GPa, a novel hybridized mode of longitudinal and transverse fluctuations originated from noncollinearity of the magnetic structure was discovered.



フラストレート量子磁性体 CsFeCl<sub>3</sub> の圧力下でのスピン・ダイナミクス。(A)-(C) さまざまな圧力下で測定された CsFeCl<sub>3</sub> の中性子スペクトル。大気圧下 (A) と 0.3 ギガパスカル (B) では1本のスペクトルが観測されたが、量子臨界点近傍の 1.4 ギガパスカル (C) では複数の特徴的なスペクトルが観測された。(D),(E) 中性子スペクトルの計算結果。位相モードと振幅モードの混成を考慮した計算 (D) は実験 (C) を再現するが、考慮しない計算 (E) は実験 (C) を再現しない。

Inelastic neutron scattering spectra. The spectra obtained at a chopper spectrometer under (A) 0.0 GPa at 6 K, (B) 0.3 GPa at 2.7 K and (C) 1.4 GPa at 0.9 K sliced by the energy transfer - wave vector ( $\hbar\omega$ - $q$ ) plane for  $q = (-k, 2k, 0)$ . The yellow circles, squares, and red diamonds are the peak positions of the excitations obtained from the constant- $q$  scans using a triple-axis spectrometer. The solid yellow curves are the dispersions calculated by ESW. Calculated neutron cross-section by the ESW under (D) 1.4 GPa at 0 K. Calculated neutron cross-section in the absence of the off-diagonal elements under (E) 1.4 GPa at 0 K. The black and red solid curves in (D) and (E) are gapless and gapped modes, respectively.

## 研究テーマ Research Subjects

1. 量子臨界点近傍におけるフラストレート磁性体の非自明な混成モード  
Nontrivial hybridized mode in frustrated magnet near quantum critical point
2. 中性子によるスピン波スピン流の検出  
Detection of spin wave spin current by neutron
3. マルチフェロイック物質におけるスピンの局所的コントロール  
Local control of spin moment in multiferroics
4. スピン液体状態の探索  
Search of spin liquid
5. 磁場誘起非相反性マグノンの観測  
Observation of field induced nonreciprocal magnon



# 中島研究室

Nakajima Group



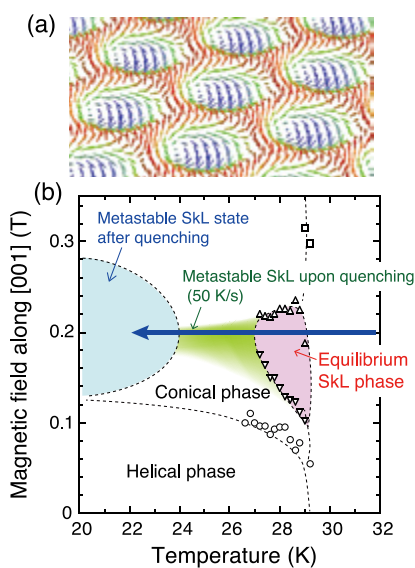
中島 多朗  
NAKAJIMA, Taro  
准教授  
Associate Professor



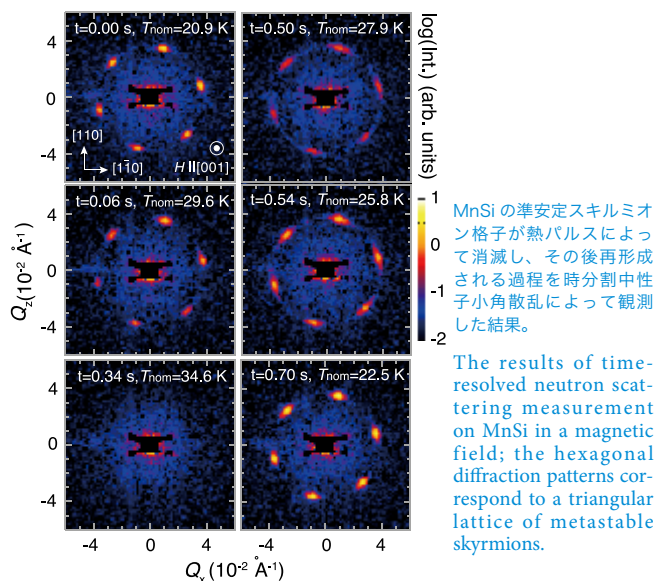
齋藤 開  
SAITO, Hiraku  
助教  
Research Associate

固体の磁気的性質は非常に古くから知られており、精力的に研究されてきたテーマである。例えば我々の身近にある磁石では、固体中のスピンの自発的に同じ方向に揃う「強磁性」が実現している。これ以外にも、らせん型や渦型など様々な磁気秩序が存在するが、近年それらのスピン配列の幾何学的特徴が、物質の誘電性、伝導性、あるいは弾性などを大きく変化させ得ることが明らかになってきた。本研究室ではこのような「スピン秩序によって引き起こされる創発物性現象」を主な研究テーマとしている。例としては、らせん型の磁気秩序によって電気分極を生じるマルチフェロイック系や、トポロジカルな渦状磁気構造である磁気スキルミオン等を対象として、中性子散乱とX線散乱を用いて磁気秩序とその励起状態を明らかにすることに取り組んでいる。また、中性子散乱技術自体を発展させるべく、多重極環境下の測定や時分割測定など、新たな手法開発にも取り組む。

Magnetism in solids has been extensively studied in the field of condensed matter physics for a long time. A well-known example is a ferromagnetism, which means that magnetic moments in a solid are spontaneously aligned to be parallel to each other owing to exchange interactions. It was recently revealed that spontaneous ordering of the magnetic moments can change not only magnetic properties of the system, but also (di)electric or elastic properties. We study the emergent cross-correlated phenomena induced by the spin orders. One example is spin-driven ferroelectricity, where a spiral magnetic order breaks spatial inversion symmetry of the system and leads to spontaneous electric polarization. Another example is a vortex-like spin texture called magnetic skyrmion, which often appears in a long-wavelength helimagnet. By the virtue of the topologically-nontrivial spin texture, the magnetic skyrmion induces an effective magnetic field acting only on conduction electrons.



(a) 磁気スキルミオン格子状態におけるスピン配列の模式図 (b) 磁気スキルミオン物質 MnSi の熱平衡 - 準安定状態図。0.2 T の磁場中で急加熱・急冷することで準安定スキルミオン状態が実現する。  
(a) A schematic of magnetic skyrmion lattice. (b) The equilibrium and metastable state diagram of MnSi. The metastable skyrmion lattice state is realized by a rapid temperature sweep in a magnetic field of 0.2 T.



MnSi の準安定スキルミオン格子が熱パルスによって消滅し、その後再形成される過程を時分割中性子小角散乱によって観測した結果。  
The results of time-resolved neutron scattering measurement on MnSi in a magnetic field; the hexagonal diffraction patterns correspond to a triangular lattice of metastable skyrmions.

## 研究テーマ Research Subjects

1. 中性子散乱による磁気スキルミオンの構造とそのダイナミクスの研究  
Neutron scattering studies on magnetic skyrmions and their dynamics
2. 光の電場成分に応答する磁気励起 - エレクトロマグノン -  
Magnetic excitations driven by the electric field component of light - electromagnons -
3. 異方的な応力を用いたマルチフェロイック物質の磁性と誘電性の制御  
Control of magnetic and dielectric properties in multiferroics by means of anisotropic stress
4. 時分割中性子散乱法を用いた磁性体における非平衡・過渡現象の研究  
Time-resolved neutron scattering studies on nonequilibrium and transient phenomena

# 田中研究室

Tanaka Group



田中 秀数  
TANAKA, Hidekazu  
客員教授  
Visiting Professor

スピン系を対象に、磁場や圧力による量子相転移や量子多体効果が顕著な磁気励起を中性子散乱実験で研究している。また、新しい物質には新しい物理があり、新しい物理は新しい物質から生まれるという信念で、物質開拓に力を入れている。

スピンドイマー系では強い磁場や圧力を加えると、非磁性の singlet 状態から磁気秩序相へ量子相転移が起こる。当研究室では秩序相での秩序モーメントの振幅モード (Higgs モード) やダイマー間相互作用の強いフラストレーションで生ずる局在励起などの新奇な磁気励起の研究を行っている。三角格子量子反強磁性体ではフラストレーションと量子効果によって、飽和磁化の  $1/3$  にプラトーが生ずる。当研究室では  $\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$  と  $\text{Ba}_2\text{CoTeO}_6$  において、この磁化プラトーを検証し、磁気励起の詳細な研究を行っている。分数スピン励起を強く示唆する線形スピン波理論と大きく異なる磁気励起スペクトルが観測されている。 $\alpha\text{-RuCl}_3$  は Kitaev 模型の候補物質である。当研究室ではこの系の相互作用を決定することを目的に低エネルギー励起を詳しく調べている。

Our aim is to elucidate quantum phase transitions in spin systems and magnetic excitations with remarkable quantum many-body effects using neutron scattering technique. We also devote ourselves to the development of materials with the belief that new materials have new physics and new physics are born from new materials.

Spin dimer system often undergoes quantum phase transition from a nonmagnetic singlet state to a magnetically ordered state in the magnetic field and hydrostatic pressure. We are studying unconventional excitations such as amplitude mode (Higgs mode) of ordered moment and localized excitations caused by strong frustration of interdimer exchange interactions. It is theoretically known that triangular-lattice quantum antiferromagnet exhibits magnetization plateau at one-third of the saturation magnetization owing to the synergy of frustration and quantum fluctuation. We verified the magnetization plateau in  $\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$  and  $\text{Ba}_2\text{CoTeO}_6$ , and investigated their excitation spectrum in details. We observed the spectrum that is much different from conventional spin wave theory and strongly suggestive of fractionalized spin excitations. We are also investigating the low-energy excitation spectrum in  $\alpha\text{-RuCl}_3$  that is a candidate of the Kitaev model to evaluate magnetic interactions.