研究短信

３次元偏極中性子解析装置クライオパッド(CRYOPAD)

スピン- 格子相関中性子散乱研究グループ
武田　全康・加倉井和久

Spherical Polarization Analysis Device, CRYOPAD

Masayasu TAKEDA, Kazuhisa KAKURAI
Research Group for Neutron Scattering Study on Spin-Lattice Correlations

電気的に中性でありスピン1/2を持つ中性子をプローブとする中性子散乱が磁気構造を調べる上で非常に強力な研究手段であることは良く知られている。しかし、中性子が磁性体と相互作用して散乱、反射、回折（以後、まとめて散乱と呼ぶ）される際に、磁気構造を反映してそのスピンの方向を変えることはあまり知られていない[1)]。普通に原子炉やパルス中性子源から取り出される中性子の個々のスピンの方向には全く相関がなく、中性子束として見た場合にスピンの方向を特定することができないため、通常の中性子散乱実験ではこの効果が無視されるためである。

一方、入射中性子のスピンの方向をそろえた偏極中性子散乱実験では、偏極中性子のスピンのある特定の方向に対する射影が、散乱過程において反転したか、しなかったかを見極めることができる。このような実験は従来から行われてきたが、中性子スピンがもつ３方向成分（s_x，s_y，s_z）のうちの s_z の情報しかわからないという意味で、この方法は１次元偏極中性子解析法である。我々のグループでは、この s_z だけでなく、s_x、s_y も含めた中性子スピンの散乱過程における方向変化を測定することのできる３次元偏極中性子解析装置、Cryogenic Polarization Analysis Device（CRYOPAD）をフランスのラウエ･ランジュバン研究所（Institut Laue-Langevin：ILL）とフランス原子力庁－グルノーブル（CEA-Grenoble）のグループと共同して開発を進めていたが、このほど、JRR－３の３軸型偏極中性子分光器（TAS-1）と組み合わせた実験で設計通りの性能を達成できたことを確認し、CRYOPADを用いた実際の研究を本格的にスタートさせた[2)]。

散乱の前後で偏極中性子のスピン方向の変化を３次元的に測定するためには、入射中性子と散乱中性子のスピン方向を正確に制御するのと同時に、散乱過程以外でのスピンの方向変化を無視できるほどに小さくしなければならない。この目的を達成するために工夫されたCRYOPADの本質的な部分が、入射偏極中性子と散乱偏極中性子のスピン方向を独立に制御するために、ふたつのハイブリッド歳差コイル（hybrid precession coil：入射-HPCと出射-HPC）を組み合わせたハイブリッド歳差トーラス（Hybrid Precession Torus：HPT）と呼ばれる特殊なコイルと、HPTを挟み込むように同心円状に配置された２枚の超伝導磁気シールド（Meissner shield）である。中性子の入射方向は常に一定であるため、入射-HPCは図１に示すように普通のコイルであるが、出射側の中性子の方向は散乱角の方向によって変わるため出射-HPCはドーナツ状に

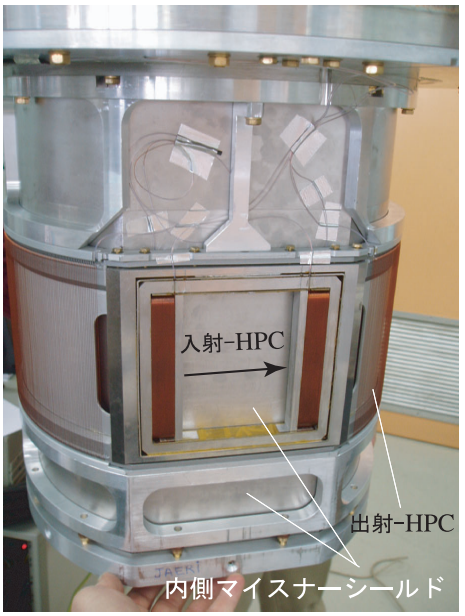

図１　外側の磁気シールドを外した状態の　　。スピンの方向を制御するためのハイブリッド歳差コイル（入射　　と出射　　）と内側の磁気シールドが見えている。

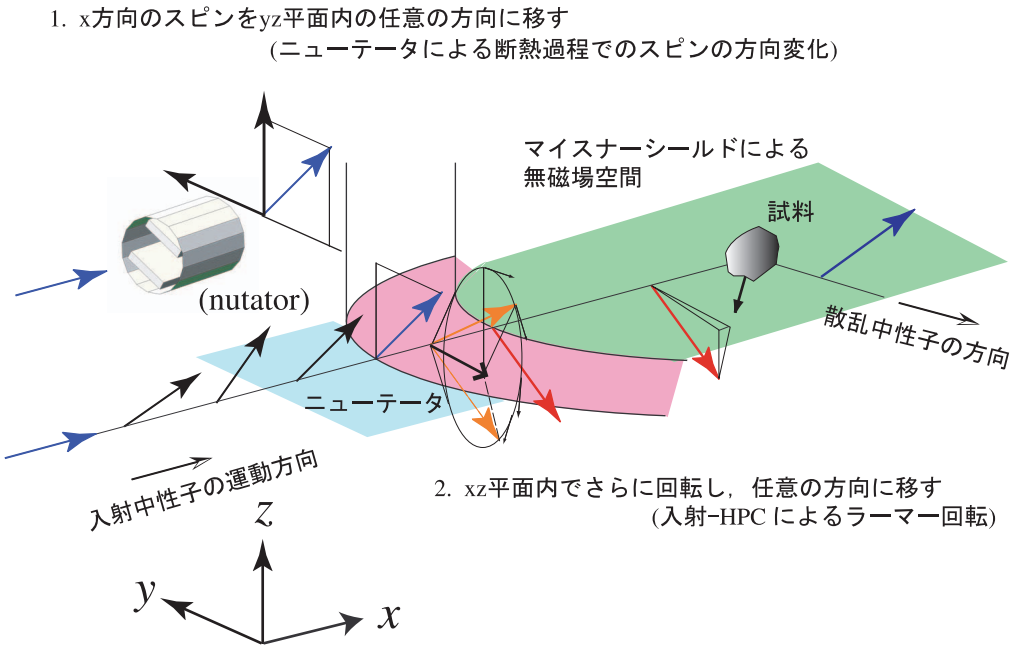

図２　中性子スピンの方向を制御する様子。ニューテータ（　　）と入射　　と呼ばれるふたつの独立のコイルによって２段階で任意の方向に向けられる。両者が作る磁場は磁気シールドによって完全に切り離されている。

巻かれている。超伝導シールドの材料には Nb を使っているため、液体ヘリウムを用いて超伝導転移温度以下に冷却している。そのため、Cryogenic を CRYOPAD という装置の名前に冠している。内側の磁気シールドのさらに内側は断熱真空層をへて直径200mm の室温の自由空間となっており、実験に応じた低温装置や圧力装置を上から挿入することができる。

詳細は参考文献[3, 4]にゆずるが、図２に CRYOPAD の簡単な動作原理を示す．最初中性子の進行方向（x 方向）に向けられた中性子スピンはニューテータ（nutator）と呼ばれる電磁石により進行方向に対して垂直な平面（yz 平面）内で任意の方向に向けられる．次に入射-HPC の作る磁場によって y 軸を回転軸として回転するが、ニューテータの作る磁場と入射-HPC の作る磁場は外側の磁気シールドで切り離されている。その結果、初め x 方向を向いていた中性子スピンは x 軸と y 軸という直交した２つの軸の回りを２段階で回転することによって入射中性子スピンとしての最終的な方向に向けられる。ふたつの HPC の作る磁場は内側の磁気シールドによって、試料空間とは切り離されるのと同時に、シールドが地磁気などの環境磁場をも遮蔽するため、入射-HPC によって最終的な方向に向けられた中性子スピンは、その方向を保ったまま無磁場空間を飛行して試料に入射し散乱する。散乱した中性子はスピンの方向を保存したまま、磁気シールドを透過した後、出射-HPC と出射側のニューテータを使ってスピン方向の検出に最も都合の良い方向に向けられることになる。図３は JRR－３の２ G 実験孔に設置されている TAS-1での CRYOPAD を用いた実験の様子

図３　　3，３軸型偏極中性子分光器（　　1）での実験の様子．

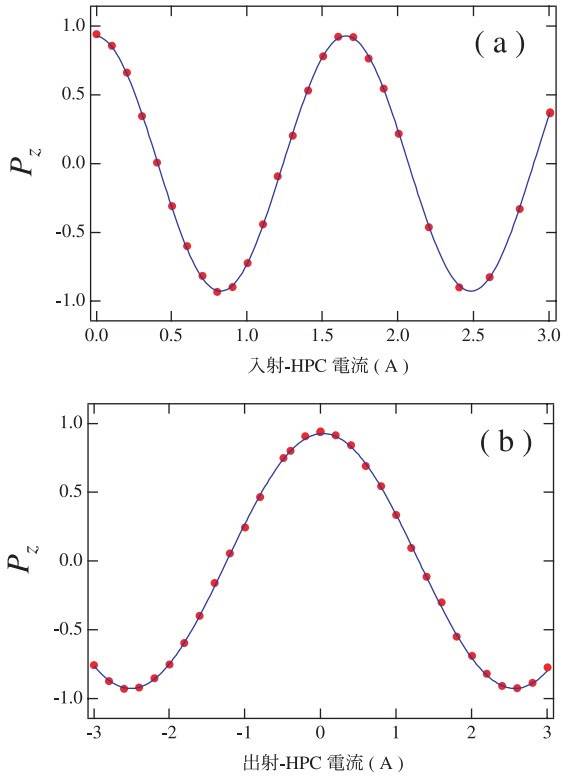

図 4　(a)入射　　と(b)出射　　による中性子スピン回転の様子．横軸はそれぞれのコイルに流した電流，縦軸は電流を流さない場合に z 軸を向いていた偏極中性子スピンの z 成分（P_z）の電流（磁場）による変化．

である。また、図 4 には入射-HPC と出射-HPC による中性子スピンの方向制御の様子を示した。コイルに流す電流に応じてスピンが y 軸の回りに回転し、z 方向の射影が余弦波的に変化していることがわかる。

CRYOPAD を用いた磁性研究における我々のグループの狙いは、グループの名前の由来となっているスピン－格子相関である。CRYOPAD は従来の手法では観測困難、あるいは不可能であった、スピン－格子相関が基底状態の選択に重要な役割を果たしていると思われる系における磁気秩序状態の決定、カイラル状態の検証、核散乱と磁気散乱の干渉項の検証等を可能にするユニークな手法として大きな可能性を秘めている。この研究は、中村充孝（中性子利用研究センター）、Eddy Lelièvre-Berna（ILL）, Francis Tasset（ILL）, Louis-Pierre Regnault（CEA-Grenoble）各博士との共同研究である。

Reference

1）S. V. Maleev, Physics-Uspekhi 45 596 （2002）.
2）M. Takeda, M. Nakamura, K. Kakurai, E. Lelièvre-Berna, F. Tasset, L. P. Regnault, Physica B（Proceedings of PNCMI 2004）投稿中
3）F. Tasset, P. J. Brown, E. Lelièvre-Berna, T. Roberts, S. Pujol, J. Allibon, E. Bourgeat-Lami, Physica B **267-268**（1999）69.
4）L. P. Regnault, B. Geffray, P. Fouilloux, B. Longuet, F. Mantegezza, F. Tasset, E. Lelièvre-Berna, E. Bourgeat-Lami, M. Thomas, Y. Gibert, Physca B **335**（2003）255.