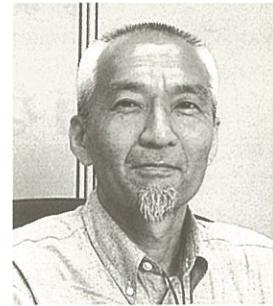


新研究グループの発足に際して

■中性子スピンが観る スピンー格子相関



スピンー格子相関中性子散乱研究グループ

■加倉井 和 久 ■

中性子散乱が固体物性を研究する上で重要な役割を果たすことは比較的良く知られるようになってきた。それは中性子の核及び磁気弾性及び非弾性散乱により、格子の構造、電子スピンの秩序、及び格子の揺らぎ、スピンの揺らぎを直接「観る」ことができるからである。そこから得られる新しい物性の微視的解明が新機能物質の創造を可能にする。中性子で上記の物が見えるのは、中性子が原子核や電子スピンと相互作用して、散乱前と後の自らの状態を変えるからである。そこで従来の中性子散乱実験とは散乱前の中性子の飛行する方向とそのエネルギーを揃えてやり、物質による散乱後に、方向とエネルギーがどの様に変化したかを測定することにより、散乱の原因となった物質の原子やスピンの配列、またはその揺らぎの情報を得ることである。しかし中性子の状態は飛行方向とエネルギー以外にもう一つの自由度により決定される。その自由度が中性子スピン状態である。この中性子スピン状態が散乱の際にどのように変化するのかを他の状態変化と同時に観測しようとする試みが偏極中性子散乱である。一般に研究用原子炉やパルス中性子源から出てくる中性子のスピン状態は揃っていない、いわゆる非偏極中性子ビームである。従来の中性子散乱はこの非偏極中性子ビームを用いて行うので、中性子スピン状態に関する情報は平均化され失われてしまう。中性子スピン状態の変化に関する情報を得るために、散乱前の中性子スピン状態を揃えてやる必要がある。このように中性子スピン状態を揃えた中性子ビームは偏極中性子ビームと呼ばれる。このような偏極中性子ビームの偏極度は偏極ベクトル \mathbf{P} により記述でき、 \mathbf{P}_i を散

乱前、 \mathbf{P}_f を散乱後の偏極ベクトルとすると、磁気的性質を持つ物質からの弾性散乱による強度($d\sigma/d\Omega$)及び偏極ベクトル \mathbf{P}_f は以下のような式で表現できる。

$$d\sigma/d\Omega = NN^* + \mathbf{P}_i \cdot \mathbf{Q} N^* + \mathbf{P}_i \cdot \mathbf{Q}^* N + \mathbf{Q} \cdot \mathbf{Q}^* + i \mathbf{P}_i \cdot (\mathbf{Q}^* \times \mathbf{Q}) \quad 1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_f d\sigma/d\Omega = & \mathbf{P}_i NN^* + \mathbf{Q} N^* + \mathbf{Q}^* N - i(\mathbf{P}_i \times \mathbf{Q} N^* - \mathbf{P}_i \times \mathbf{Q}^* N) \\ & + \mathbf{Q}(\mathbf{P}_i \cdot \mathbf{Q}^*) + \mathbf{Q}^*(\mathbf{P}_i \cdot \mathbf{Q}) - \mathbf{P}_i(\mathbf{Q} \cdot \mathbf{Q}^*) - i(\mathbf{Q}^* \times \mathbf{Q}) \end{aligned} \quad 2)$$

ここで $N = N(\mathbf{k})$ は核構造因子 (N^* はその複素共役量) で物質の中の原子核と中性子の相互作用を記述し、 $\mathbf{k} = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_f$ は散乱ベクトルで入射波数ベクトル \mathbf{k}_i と散乱波数ベクトル \mathbf{k}_f の差で定義され、中性子がどの方向に散乱されるかを表現する。この項による規則的な原子核の配列によりある特定な方向に観測される核プラグ散乱が構造に関する情報を与える。 $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}(\mathbf{k})$ は磁気相互作用ベクトルと呼ばれ (\mathbf{Q}^* はその複素共役量)、中性子と物質の中の磁気モーメントとの相互作用を表す。上記の核プラグ散乱と同じように、この相互作用によりある特定な方向に観測される磁気プラグ散乱は磁気モーメントがどのように整列しているかを教えてくれる。磁気モーメントの配列の場合には、モーメントの向きの自由度が参入するために、相互作用がベクトルという形で表現される。

簡単な例として、反強磁性物質の核散乱と磁気散乱が非偏極中性子散乱を用いるとどのように見えるかを、上記の式を用いて説明してみよう。非偏極中性子散乱の場合には $\mathbf{P}_i = 0$ 及び \mathbf{P}_f の測定も行わないでの、

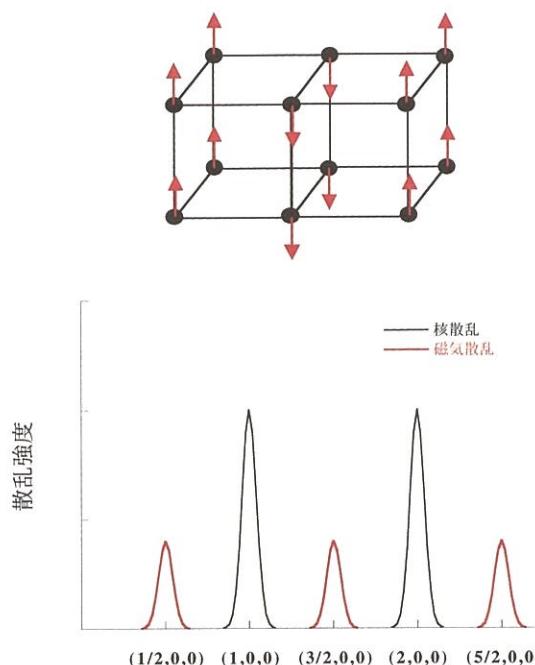


図1. 反強磁性秩序をもつ格子と非偏極中性子散乱により観測できる核ブラッグ散乱と磁気ブラッグ散乱の模式図。

強度に関する結果のみが1)式により

$$d\sigma/d\Omega = NN^* + \mathbf{Q} \cdot \mathbf{Q}^*$$

で与えられる。図1に模式的に示すように、格子を構成する原子核による核ブラッグ散乱と反強磁性秩序により2倍の周期を持つ磁気ブラッグ散乱が同時に観測される。この式からも解るように、核散乱と磁気散乱の干渉項は存在しない。またモーメントの向きに関する情報も多数の \mathbf{k} における散乱強度の比較から磁気相互作用ベクトルの方向を決めなければならない。

それにくらべて偏極中性子散乱で任意の \mathbf{P}_i からの偏極ベクトルの \mathbf{P}_f への変化を測定できれば、2)式による磁気相互作用ベクトルと核構造因子の干渉項 ($\mathbf{Q}N^*$ を含む項) または磁気相互作用ベクトルによる偏極ベクトルの回転 ($\mathbf{Q} \cdot \mathbf{Q}^*$ を含む項) からモーメントの向きに関する情報を得ることが可能になる。後者に関しては勿論上記の例のような簡単な反強磁性秩序の場合には非偏極中性子散乱による強度の解析で十分な結論が得られるが、非常に複雑な磁気構造を示す物質の場合には偏極ベクトルの解析が不可欠になってくると思われる。

しかしそれ以上に前者の磁気相互作用ベクトルと核構造因子の干渉項は上記の式からも明らかなように非偏極中性子散乱では絶対に得られない情報である。またこの干渉項に関しては、これまで行われてきたガイド磁場中による偏極中性子散乱でも十分な情報が得られていないかったと思われる。Moon, Riste, and

Koehler[1]により先駆的に行われた偏極中性子解析では中性子の非偏極化を防ぐために常に一定方向にガイド磁場をかけていた。これによりガイド磁場により決められた量子化軸方向のみの偏極度を解析している。このような一次元的偏極度解析は上記の三次元的偏極ベクトル解析の特殊なケースであり、そのために量子化軸方向に対して平行、あるいは反平行の偏極度成分の変化のみを non-spin flip (NSF) 及び spin flip (SF) 成分として記述することで、以下のようなルールが得られた。それは

1) 弹性及び非弾性核干渉性散乱は全て NSF 散乱である。

2) 中性子の偏極方向を散乱ベクトルに平行にした場合、全ての磁気散乱は SF 散乱である。

というもので、磁気散乱と核散乱の識別に重要な役割を果たしている。

しかし上記の磁気相互作用ベクトルと核構造因子の干渉項による三次元的偏極ベクトルの変化は量子化軸方向に対して垂直な成分を含んでおり、この成分の偏極度はガイド磁場中の歳差運動により失われてしまう。従ってこの干渉項による偏極ベクトルの変化を観測するためには、無磁場中で任意の \mathbf{P}_i からの変化を測定しなければならない。

これを実験的に可能にすると思われるが、F. Tasset 等 [2] により開発された CRYOgenic Polarization Analysis Device (CRYOPAD) で、試料周辺の無磁場状態を超伝導マイスター効果を利用して実現させたものである。図2に CRYOPAD の模式図と任意な偏極ベクトル \mathbf{P}_i の形成を示す。ガイド磁場を通過してくる偏極中性子が非磁性回転機構で制御される incident nutator 磁場により入射方向に垂直面内で任意の方向に回転され、マイスター・シールドにより隔離された secondary incident coil の縦歳差磁場中で偏極ベクトル \mathbf{P}_i が任意な方向に制御され、ゼロ磁場試料領域内で試料により散乱される。散乱後の \mathbf{P}_f は入射の際と逆の過程を経て解析される。

これまで弹性散乱の偏極ベクトルの変化について議論してきたが、同じような磁気相互作用ベクトルと核構造因子の干渉項は非弾性散乱においても存在すると考えられる。上記の議論から従来の散乱手法ではこのような項の観測がなぜできなかったかが明らかになったと思う。しかし要求されるのは中性子スピンの完

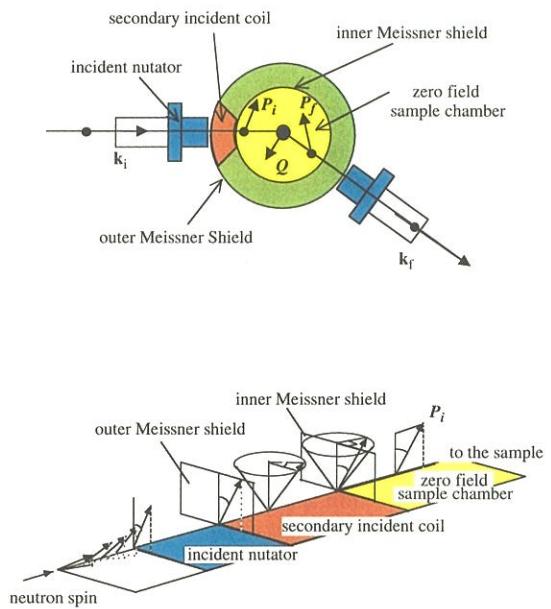


図2. CRYOPADの模式図及び偏極ベクトル P_i の形成の過程。

全制御であり、大きな試料を必要とする非弾性散乱でこのような中性子スピン制御が実際にできるかが大きな課題である。

近年話題になっている高温超伝導体物質、巨大磁気抵抗物質等ではスピンと格子の相互作用が密接にかかわり合い、新しい物性を創造していると考えられるようになってきているが、その揺らぎの相関を直接「観た」例はまだ無いと思われる。ここで解説した三次元偏極ベクトル解析を先端基礎研究センターで実現させ、スピン-格子相関の役割を解明して次世代の新機能物質の開発に繋げればと夢見る今であるが、まだまだ道のりは長く、険しく、これから皆様からのコメント、アイデア等をいただければ幸いと思っている。

References :

- [1] R.M. Moon, T. Riste, W.C. Koehler, Phys. Rev. 181 (1969) 920.
- [2] F. Tasset, P.J. Brown, E. Leliévre-Berna, T. Roberts, S. Pujol, J. Allibon, E. Bourgeat-Lami, Physica B 267-268 (1999) 69.