

X線分光で見るクラスター磁気八極子

木 俣 基[†] (東北大学金属材料研究所 motoi.kimata.b4@tohoku.ac.jp)

雀 部 矩 正 (熊本大学産業ナノマテリアル研究所 sasabe@kumamoto-u.ac.jp)

近年、物質中のスピンに由来して伝導電子の軌道が曲がる**異常ホール効果**や、磁気熱電効果の一種である**異常ネルンスト効果**が、次世代のスピン트로ニクス、エネルギー変換、センサ等の要素技術として大きな注目を集めている。このような磁性体の電気磁気応答は、スピンの方向に揃った強磁性体で大きくなるのがこれまで知られており、盛んに研究されてきた。一方で、スピンの打ち消し合うように配列した反強磁性体では正味の磁化が小さいため、直感的には大きな電気磁気応答の発現は期待できない。

しかし近年、一種の反強磁性体である Mn_3Sn において、強磁性体に匹敵する異常ホール効果が観測された。 Mn_3Sn の自発磁化は、強磁性体の数百分の一程度であるため、この結果は、異常ホール効果の強度が磁化に比例するという従来の経験則を覆すものである。近年の理論的理解では、異常ホール効果の直接的起源は波数空間における**ベリー曲率**であり、磁化は必ずしも必要ではないことが知られている。 Mn_3Sn においてはトポロジカル電子構造に起因する大きなベリー曲率がその起源として提案されている。

異常ホール効果の発現において必要となるもうひとつの要素が、時間反転対称性の破れである。例えば強磁性体の場合は大きな自発磁化によって時間反転対称性が破られる。一方、磁化の小さな Mn_3Sn では、どのようにして異常ホール効果を許容する時間反転対称性の破れが生じるのかについての理解は十分ではなかった。

この問題に一つの解釈を与えるのが**クラスター多極子**理論である。この理論によれば Mn_3Sn の磁気構造はクラスター磁気八極子が向きを揃え、強的に配列した秩序と考えることができる。 Mn_3Sn におけるクラスター磁気八極子は正味の磁化がなくても

時間反転対称性を破り、強磁性と同じ性質の対称性を持つことが示されている。クラスター多極子は従来から知られる原子に局在した多極子とは異なり、反強磁性磁気構造を複数のサイトにまたがって考えることで出現する自由度である。

上記のように、 Mn_3Sn における時間反転対称性の破れは、複数の副格子サイトにまたがる多極子を考えることで理解されている。しかし局所的な電子状態とのつながりは解明されていなかった。この疑問に答える実験手法の一つに、X線磁気円二色性(XMCD)を利用した分光法が考えられる。

XMCDは磁性体に入射した円偏光X線の吸収係数が左円偏光と右円偏光で異なる現象である。X線吸収は基本的に原子で起こるため、これまで主に強磁性体を中心とした磁性体の局所電子状態の解明に広く利用されている。XMCDの起源には、スピンと軌道モーメントに加え電子軌道の異方向性を反映した一種の原子多極子に起因する成分(T_2 項)が以前から知られていた。しかし、通常の強磁性体ではその寄与はスピン等に比べて一般に小さく、着目されることが多い。また T_2 項の起源である原子多極子とクラスター磁気八極子秩序の関係性も明らかになっていなかった。

今回我々は、XMCDを Mn_3Sn に適用し、 T_2 項に起因するXMCD信号が、時間反転対称性を破るクラスター磁気八極子秩序でのみ活性となることを明らかにした。

この結果は、放射光X線による高次多極子秩序の新たな検出原理を実証するものである。クラスター多極子は、スピンロニクスやマルチフェロイクスに有用な物質機能の起源として近年注目されている。今回実証された多極子秩序の検出原理が、今後さまざまな物質機能の起源解明や新物質開拓の促進に寄与することを期待したい。

用語説明

異常ホール効果, 異常ネルンスト効果:

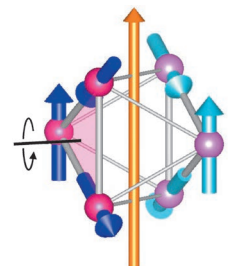
例えば強磁性体では通常の外部磁場によるホール効果に加え、磁化に比例するホール効果(異常ホール効果)が知られている。異常ホール効果によって生じたホール電流は一般にスピン偏極しているため、スピン流の生成やそれによる磁化の制御などへの応用も期待されている。また異常ネルンスト効果は異常ホール効果の入力電流を熱流に置き換えた配置で発現し、熱流に対して垂直に電位差が現れる。熱流と平行に電位差が出現するゼーベック効果とは異なる配置での熱電素子への応用などが期待されている。

ベリー曲率:

バンド構造に基づく異常ホール効果やネルンスト効果の起源。運動量空間における伝導電子に対する形式的な磁場とみなして仮想磁場とも呼ばれる。強磁性と同じ対称性を持つ磁気構造の場合、波数空間におけるベリー曲率の積が有限となり、異常ホール効果が生じうる。

クラスター多極子:

磁気構造を特徴づけるマクロな秩序変数。 Mn_3Sn では八面体の頂点に図のようにスピンの配置したクラスター磁気八極子が実現する。太い灰色のボンドで形成される三角形の面(薄い赤で示した)に垂直な軸(黒い実線)の周りの回転対称性を考えると、この磁気構造は強磁性を特徴づける軸性ベクトル(下図のオレンジの長い矢印)と同じ対称性を持つ。したがって異常ホール効果の発現を許すことが理論的に示されている。



[†] 編集委員が著者に含まれておりますが、このような場合、会誌編集委員会では別の委員を担当編集委員に選び、記事の公正さを保つという内規に従っております。