

稀土磁性材料磁结构的中子研究进展

刘丹^{1*}, 任建宇¹, 陈卫强¹, 郑宇沙¹, 漆星¹, 息剑峰^{1*}

(1. 北京工商大学, 北京 100048)

摘要: 稀土磁性材料凭借其 4f 电子独特的强自旋-轨道耦合、高原子磁矩及丰富电子能级, 在永磁、磁致冷等高新技术领域具有不可替代的战略地位。稀土磁性材料中电子交换作用、磁多极相互作用与晶体场效应的多重竞争机制给揭示磁相变机制与量子激发行为带来本质性挑战。中子散射技术以其磁矩敏感性、强穿透性和轻元素分辨能力, 成为揭示稀土磁结构微观机制的核心手段, 该技术已在稀土永磁材料矫顽力优化、磁致冷材料磁熵变调控等领域取得突破性进展。本文系统综述中子散射技术的原理方法及其在稀土磁性材料磁结构研究中的前沿应用, 包括稀土过渡金属化合物、稀土阻挫磁体、稀土低维磁体等。希望为稀土磁性材料磁结构的进一步研究提供参考。

关键词: 稀土、中子散射技术、磁结构、磁性材料

中图法分类号: TG146.45, O441.6

1 引言

稀土磁性材料作为现代高新技术产业的战略基石, 其性能核心源于电子自旋、轨道、晶格等多种相互作用的量子调控。稀土元素独特的 4f 电子及原子层结构使材料具有不可替代的量子特性与功能调控维度^[1-3]: 强自旋-轨道耦合, 4f 电子轨道角动量与自旋角动量强烈耦合, 导致显著的磁各向异性和复杂的能级劈裂); 高原子磁矩, 未配对 4f 电子与轨道磁矩叠加, 产生超顺磁或铁磁有序); 丰富电子能级, 4fⁿ 组态在晶体场中分裂为 Stark 能级, 形成从紫外到红外的离散跃迁通道)。这些特征使其在永磁材料、磁致冷材料、磁致伸缩材料等领域不可替代^[4]。

*基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFA1610400), 国家自然科学基金 (52088101, 52371169)

作者简介: 刘丹, 女, 1992 年生, 教授, 北京工商大学, 北京 100048, E-mail: liudan@iphys.ac.cn

71。国务院《国民经济和社会发展“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要》明确提出“培育稀土行业新动能”，将稀土功能材料研发列为国家重大战略需求。随着风电、新能源汽车、航天军工等领域对高性能磁性器件的需求激增，揭示稀土磁性材料的微观磁结构演化机制已成为突破性能瓶颈的关键^[8-10]。

稀土磁性材料中存在电子交换作用、磁偶极/多极相互作用、晶体场效应及强自旋-轨道耦合等多重竞争机制，导致材料具有丰富的磁有序行为^[11-14]。从常规的铁磁/反铁磁序，到非共线螺旋磁序、斯格明子拓扑态、量子自旋液体等，这些磁序的竞争与演化直接决定材料的矫顽力、磁能积、磁熵变等宏观性能^[15,16]。然而，稀土磁性材料的磁结构研究面临以下挑战：（1）序参量耦合复杂性：大离子半径的稀土掺杂易引发晶格畸变，晶体结构与磁结构耦合形成多重序参量竞争；（2）表征局限性：传统 X 射线衍射因对电子强烈散射且穿透深度有限（ μm 级），难以区分磁散射信号与核散射信号，而电子显微镜易引入电磁干扰，光学手段缺乏原子级分辨率；（3）极端条件需求：磁结构在温度、磁场、压力等多物理场调控下呈现非平衡态演化，需原位实时表征。中子散射技术，特别是时间飞行中子衍射和极化中子衍射（PND）的突破性优势为上述挑战提供了原子尺度的动态解决方案。自 1949 年 Shull 等人^[17]利用中子衍射技术首次证实 MnO 的反铁磁有序以来，该技术已发展为磁结构研究的“终极探针”。中子散射技术在磁性材料研究中的优势首先在于其磁矩敏感性，中子自身磁矩可与材料原子磁矩直接耦合，产生磁散射信号实现对磁有序类型的直接成像。其次，中子散射技术具有深度探测能力，中子电中性赋予其强穿透性，支持原位多物理场（磁场/压力/极端温度）下的材料磁结构演化研究。此外，中子散射技术可以有效分辨轻元素，对氢、锂等轻元素及同位素具有高灵敏度，适用于掺杂体系分析。

中子散射技术主要分为弹性散射和非弹性散射两大类：弹性中子散射（如粉末衍射、单晶衍射）中子与样品相互作用后能量不变，仅动量发生转移，主要用于研究材料的静态晶体结构和磁结构，能够精确测定原子位置和磁矩排列；非弹性中子散射（包括飞行时间谱仪、三轴谱仪等）中子与样品交换能量，动量和能量均发生变化，则用于探测动力学过程，如声子、磁振子等元激发，可测量能量转移和动量转移的完整关系^[18-23]。此外，极化中子技术通过分析中子自旋状态，可区分材料的核散射和磁散射，特别适合研究复杂磁结构和自旋动力学。小角中

子散射则用于研究纳米尺度(1-100 nm)的结构特征,如磁畴分布和聚合物形态。这些技术共同构成了从原子尺度到介观尺度、从静态结构到动态过程的完整表征体系^[24-27]。中国散裂中子源、中国先进研究堆、绵阳研究堆等大科学装置的建成,更使原位多场调控下的磁结构动态解析成为可能。目前稀土材料磁结构的中子研究仍面临多重挑战,比如强中子吸收问题、复杂磁结构解析以及多尺度关联缺失等。本文首先对中子散射技术的基本原理及其测试原理进行简要介绍,综述中子散射技术在稀土磁性材料磁结构研究中的典型应用和最新进展,最后讨论目前稀土磁性材料磁结构中子研究存在的挑战和对未来发展的展望。

2 中子散射技术

中子散射技术是通过分析中子束与物质相互作用后的能量和动量变化来研究物质微观结构和动力学特性的重要手段。其物理原理基于中子作为电中性粒子具有磁矩的特性,能够与原子核(核散射)和未配对电子(磁散射)发生相互作用。中子散射技术基本原理如图 1 所示,一束波矢为 k_i 、能量为 E_i 的中子入射到样品晶体后发生散射作用,散射后的出射中子束的波矢和能量分别为 k_f 和 E_f ,入射波矢和出射波矢之间的夹角为 2θ 。散射过程遵循动量和能量的守恒,且波矢和能量的转移 Q 和 E 分别为:

$$Q = k_i - k_f \quad (1)$$

$$E = E_i - E_f \quad (2)$$

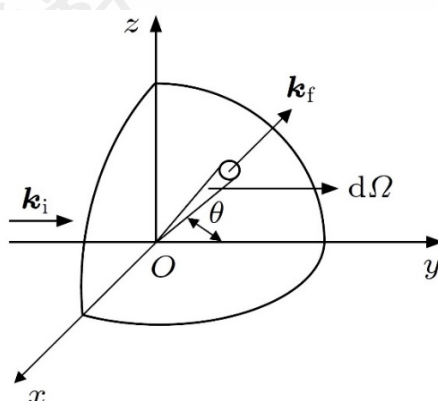


图 1 中子散射三维示意图

若散射过程中中子只和原子核或者材料中的静态有序磁矩发生作用,没有能

量转移，即 $k_i = k_f$ ，这种散射过程被称作弹性中子散射，可以用来探测材料中的晶格结构或磁结构。如果中子和材料中的晶格振动或者磁激发等发生相互作用而产生了能量转移，则该散射过程被称为非弹性中子散射，能够反映微观粒子的运动过程。

中子衍射技术作为中子散射的重要分支，主要利用弹性散射过程来测定材料的晶体结构和磁结构。与 X 射线衍射和电子衍射相比，中子衍射具有核信号与磁信号协同探测的独特优势，不仅能够精确测定晶格常数、原子占位等结构参数，还能解析磁性材料的自旋排列和磁矩分布特征^[28]。中子衍射同样遵循布拉格衍射定律 $n\lambda = 2d \sin\theta$ ，其中 d 是晶面间距， θ 是布拉格角，当中子入射到样品时会产生衍射峰，通过分析衍射峰的位置、强度和线型，可以精确测定晶格常数、原子占位和磁矩取向。结合中子特有的强穿透性和同位素分辨能力，该技术可在高压、低温、强磁场等多物理条件下，实现材料原位结构演化、轻元素精确定位及其构效关系的深入研究。现代中子衍射技术已发展出多种先进方法：高分辨粉末衍射可解析复杂晶体结构的细微畸变；单晶衍射能确定绝对构型；极化中子衍射可分离核散射与磁散射贡献；应变扫描衍射用于工程材料残余应力分析等^[29-33]。

目前我国已建成多台国际先进的中子大科学装置，主要包括：中国散裂中子源（CSNS，东莞）、中国先进研究堆（CARR，北京）和中国绵阳研究堆（CMRR，绵阳）三大核心设施。CSNS 是我国首座、世界第四座脉冲式散裂中子源，2018 年建成投用，现配备通用粉末衍射谱仪(GPPD)、小角中子散射谱仪(SANS)和多功能反射谱仪(MR)等多台谱仪，CSNS 二期计划建设高能非弹谱仪、冷中子非弹谱仪和极化非弹谱仪等，在中子通量方面二期项目会将功率升级到~500 kW，可以大幅提高实验效率为超导、量子磁性等研究领域提供先进的中子散射研究平台。CARR 是亚洲性能最好的研究堆之一，热中子注量率达 $8 \times 10^{14} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ，运行功率 60 MW，配备高分辨粉末衍射仪、应力谱仪等 15 台谱仪，特别适合开展高温高压等极端条件下的中子衍射研究。CMRR 是我国西南地区最重要的中子科学平台，热中子注量率达 $2 \times 10^{14} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ，重点发展极化中子技术和原位表征方法，在量子材料、核材料等研究领域独具特色。这些装置与同步辐射光源、强磁场装置等形成互补，构建了我国多尺度物质科学研究的大科学装置集群，为新材料研发、高端装备制造等国家战略需求提供了不可替代的研究手段。

3 稀土磁性材料中子研究进展

稀土过渡金属化合物，稀土阻挫磁体，稀土低维磁体这三类材料是稀土磁性材料的核心分支。它们的磁特性均来源于稀土元素 4f 轨道电子，而它们的磁结构复杂性均源于多种磁相互作用的竞争与协同。稀土过渡金属化合物竞争源于多组分交换作用。稀土阻挫磁体中稀土离子的各向异性交换作用与几何阻挫形成竞争，催生量子自旋液体等量子态。稀土低维磁体竞争源于低维限域效应增强量子涨落。这三类材料最终的磁结构是多种相互作用达到平衡的结果，而这种平衡可通过组分、晶格、维度等调控，这是稀土磁性材料功能可调的核心机制。这三类材料的研究进展相互支撑，共同推动稀土磁性材料向更高性能、更丰富量子态发展。这三类材料的磁结构均具有复杂性、量子性，传统表征手段无法区分核散射和磁散射，而中子散射技术凭借磁矩敏感性、强穿透性、轻元素敏感性等，成为能够穿透表象揭示这三者内在共通微观物理的研究工具。

3.1 稀土过渡金属化合物的复杂磁结构与相变

稀土-过渡金属 (RE-TM) 化合物因其竞争性磁相互作用 (RE-RE、RE-TM、TM-TM 交换) 和晶格自由度 (如不等价位点、固溶无序) 而呈现丰富的磁有序行为，包括多级相变、非公度磁序及磁相共存等现象。中子散射技术通过原子磁矩灵敏性、轻元素探测能力及动量-能量分辨优势，成为解析此类复杂体系的核心手段。

2020 年, Rai 等人^[34]通过极化中子衍射与非弹性中子散射联用技术研究了极性四方反铁磁材料 NdCoGe₃ 的磁结构。通过中子粉末衍射在 1.8 K 下观测到 NdCoGe₃ 的多组分裂的磁布拉格峰, 说明 NdCoGe₃ 具有三维非公度磁结构。通过单晶衍射的精确扫描, 揭示了在 $T_{N2} = 3.5$ K 时发生的磁相变, 在此温度以下存在复杂的非公度磁相 II。中子衍射数据表明, $T_{N1} = 3.70$ K 和 $T_{N2} = 3.50$ K 以下的磁结构为非公度结构, 其基态磁序在所有方向均与 1.8 K 的传播矢量 $k = (0.494, 0.0044, 0.385)$ 呈非公度关系。这一研究凸显了中子散射在解析复杂磁序中的不可替代性, 为极性材料中拓扑磁态的探索开辟了新路径。

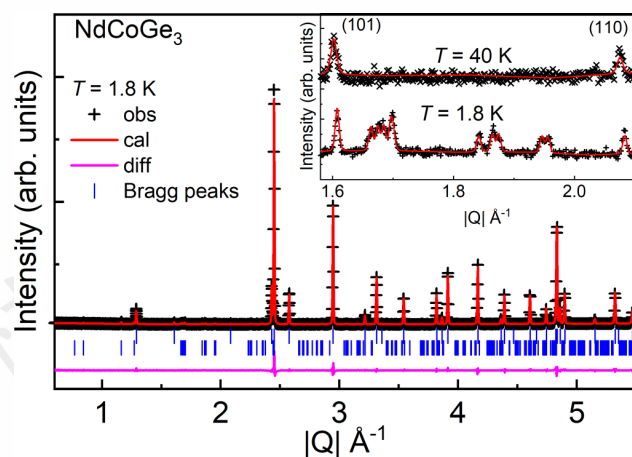


图 2 NdCoGe₃ 在 $T = 1.8 \text{ K} < T_{N2}$ 时的中子粉末衍射图谱^[34]

2020 年北京大學楊金波教授課題組^[35]通過中子散射技術系統研究了 Ce 替代對 $(\text{Nd}_{1-\delta}\text{Ce}_{\delta})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ($0 < \delta < 1$) 體系的結構與磁學性質影響，揭示了 Ce 占位偏好性、相分離機制及磁矩演化規律。中子衍射數據表明，在單相區 ($\delta < 0.2$ 或 $\delta > 0.4$)，Ce 優先佔據較大的 4g 位而非 4f 位，在 $\delta = 0.254$ 時，Ce 在 4f 與 4g 位占位比接近 1:1，證實 $0.2 < \delta < 0.4$ 區間存在同構雙主相分離；體系中 Ce 價態穩定且以 +3 價為主；Fe 平均磁矩隨 δ 增加而降低，主要源於 Ce 替代引起的晶格收縮和電子鍵合變化。此工作為開發低成本 Ce 基永磁體提供了關鍵微观机理，說明中子衍射技術因其對輕元素 B 位置和磁性離子占位的靈敏探測在解析複雜磁結構中的不可替代性。

2021 年 Provino 等人^[36]通過中子散射技術研究了 $\text{Ho}_2\text{Ni}_{0.8}\text{Si}_{1.2}$ 和 $\text{Ho}_2\text{Ni}_{0.8}\text{Ge}_{1.2}$ 的磁結構。通過高分辨率和高通量中子粉末衍射，研究揭示了三元稀土金屬化合物複雜的磁有序行為，中子衍射數據表明，兩種化合物中均存在兩種磁傳播矢量，硅化物和鎳化物在 $T_C = 38 \text{ K}$ 和 37 K 的初級相變導致具有鐵磁和反鐵磁分量的公度磁結構，在更低溫度下，硅化物和鎳化物分別於 $T_{N2} \sim 24 \text{ K}$ 和 $\sim 22 \text{ K}$ 以下出現額外的反鐵磁耦合，並與初級磁結構共存，這種複雜磁結構可能歸因於晶格中 4 個不等價 Ho 位點的競爭性交換作用。此研究為設計具有多級磁相變的稀土功能材料提供了新平台，其結構與磁性關聯的解析策略尤其是中子衍射對共存磁序的表征方法對類似體系研究具有示範意義。

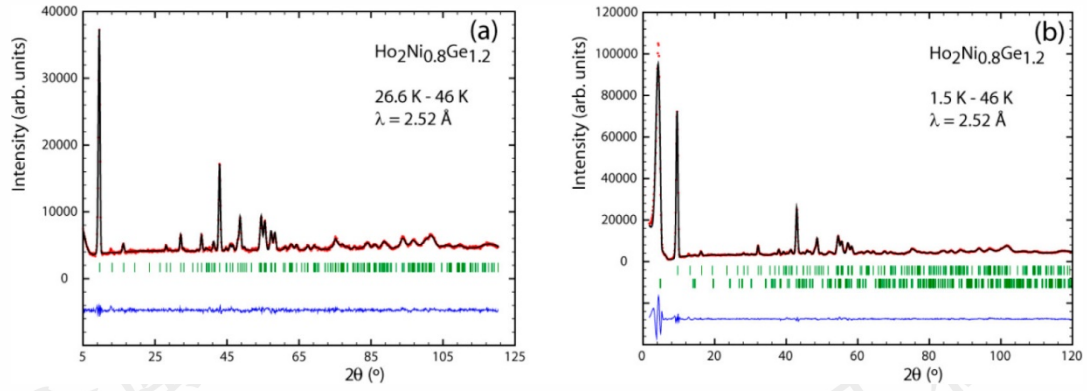


图 3 $\text{Ho}_2\text{Ni}_{0.8}\text{Ge}_{1.2}$ 样品在(a) 26.6~46 K 和(b) 1.5~46 K 下的中子强度^[36]。

2022 年 Siebeneichler 等人^[37]通过中子散射技术研究了 $\text{LaMn}_2(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_2$ 固溶体 ($0 \leq x \leq 1$) 的磁相图演变规律。研究团队在 3~500 K 温区对 $x = 0 \sim 1$ 范围内的 8 种组分进行了高分辨中子衍射测试，通过中子特征磁衍射峰识别出五种磁构型，分别是反铁磁平面螺旋、反铁磁层、铁磁分量及其叠加态、锥形磁结构混合非公度相和倾斜反铁磁非公度相。这揭示了 Ge/Si 比例调控磁结构的物理机制，建立了磁有序类型与锰层间距的普适相图，并发现磁相共存是此类材料的本征特性。这为设计磁性功能材料如斯格明子载体提供了新思路。

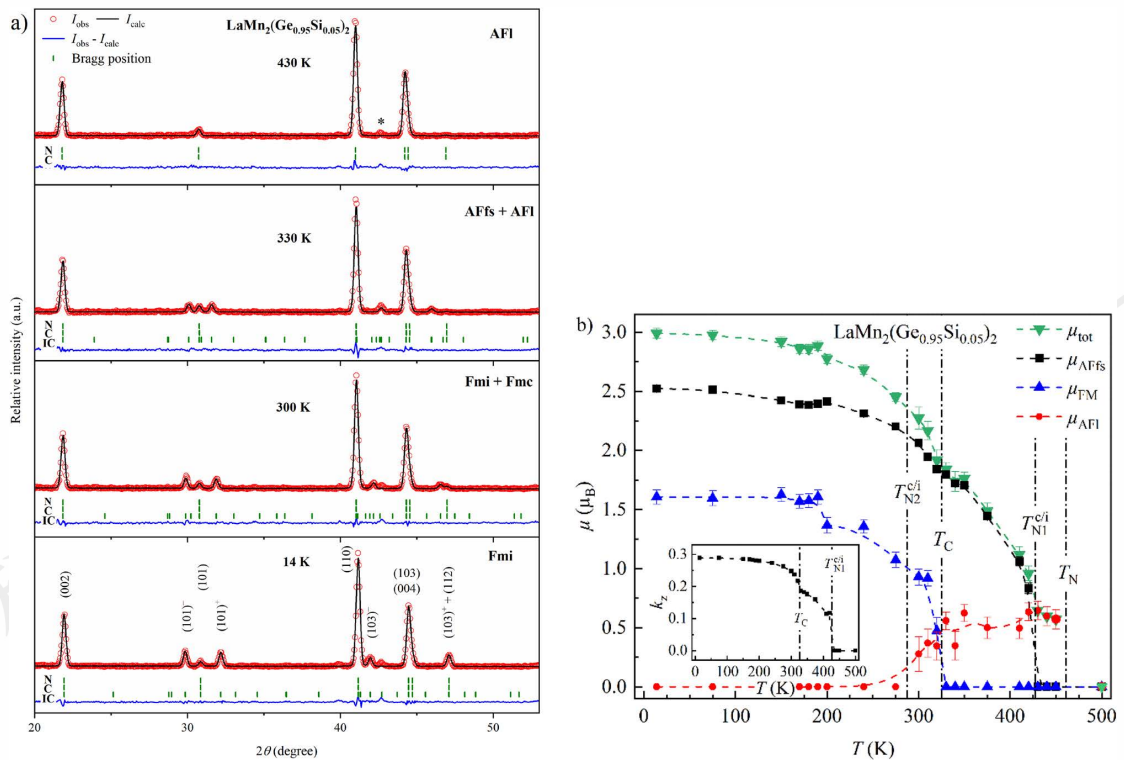


图 4 (a) $\text{LaMn}_2(\text{Ge}_{0.95}\text{Si}_{0.05})_2$ 在 14 K、300 K、330 K、430 K 下的粉末中子衍射数据。(b) 由

粉末中子衍射数据细化得到的总磁矩 μ_{tot} 及各部分分量与温度的关系^[37]。

对于稀土-过渡金属化合物，利用了中子磁矩与材料原子磁矩的直接相互作用这一独特优势，能够无损探测材料的静态磁结构和动态磁激发。2022年 Arai 等人^[38]通过非弹性中子散射精确测定了 CeSb 中局域 4f 电子的晶体电场能级分裂，排除了低能的磁偶极激发作为潜在玻色子的可能性，为拉曼光谱发现的更高能的四极激发提供了关键佐证。这项工作说明在具有强自旋轨道耦合与晶体场效应的稀土体系中，除了传统的磁偶极相互作用外，四极矩乃至更高阶的多极矩自由度可以通过与巡游电子的耦合，对低能电子结构产生巨大且可调控的重整化效应。Kish 等人^[39]利用高分辨非弹性中子散射测量 YbAlO₃ 单晶，清晰地揭示了材料中自旋子连续谱随温度的演变过程，其色散上边界在高温下依然保持锐利。它表明基于稀土离子 Yb³⁺实现的有效自旋链，其分数激发自旋子受拓扑性保护，能够抵御高温下的常规碰撞退相干机制。Shoup 等人^[40]利用极化中子反射技术通过测量自旋依赖的反射率，在实空间直接重构出垂直于 Fe_{1-x}Gd_x 薄膜方向的核密度与磁化强度深度剖面。这一纳米尺度深度磁化剖面的成像揭示了宏观磁测量无法发现的磁层以及同一结构层内磁补偿温度的空间非均匀性，为理解厚度驱动的磁重构提供了直接证据。Kapoor 等人^[41]综合运用高分辨率中子粉末衍射与非弹性中子散射测量了稀土基量子磁体 BiYbGeO₅，结果说明 BiYbGeO₅ 是微观结构无序但磁学孤立的量子二聚体系统。这项工作通过中子散射的多尺度探测，将结构缺陷与磁激发谱直接关联，深化了对稀土量子磁体中无序与关联相互作用竞争的理解。这些研究从宏观薄膜剖面到微观量子纠缠，从静态多极序到动态耦合激发，说明了中子散射的不同模式研究磁性材料获取磁矩在空间和时间上如何关联与演化的关键信息的不可替代性^[42]。

3.2 稀土阻挫磁体与量子自旋液体的中子散射研究

稀土阻挫磁体与团簇体系作为探索新奇量子态的前沿载体，因其强自旋-轨道耦合、晶体场效应及几何阻挫的协同作用，为量子自旋液体 (QSL)、分数化激发和拓扑序等非经典行为提供了理想平台。中子散射技术凭借其全动量-能量窗口覆盖能力与磁矩探测灵敏度，在此类体系的微观机制解析中发挥不可替代作用：一方面，通过弹性散射排除长程磁有序（如 Ba₃Tb(BO₃)₃、Rb₃Yb(VO₄)₂ 的无磁布拉格峰），结合非弹性散射探测分数化连续谱（如 Yb:Gd₃Ga₅O₁₂ 的自旋泥浆

态)和局域激发(如 $\text{CeTa}_7\text{O}_{19}$ 的平带晶体场跃迁);另一方面,精准量化阻挫竞争机制(如 Nd_3BWO_9 的笼目晶格畸变、 SrTb_2O_4 的弱交换作用)及维度效应(如 TbInO_3 的二维短程关联)。这些研究不仅建立了阻挫源-晶体场-量子态的理论关联,更为设计可调控量子材料(如纯净晶格 QSL 候选体、磁致冷介质)提供了微观基石,凸显中子散射在解锁强关联稀土体系深层物理中的核心地位。

2018 年复旦大学陈钢教授课题组^[43]系统地研究了三角晶格反铁磁体 YbMgGaO_4 在磁场下的自旋激发行为,为其量子自旋液体态的存在提供了关键的中子散射证据。该研究通过非弹性中子散射技术,在 2.5 T 弱场和 9.5 T 近饱和场不同磁场下对 YbMgGaO_4 的单晶样品进行了高分辨率测量,揭示了其激发谱的连续性和场致演化特征。在 2.5 T 弱场下,观察到一个明显的色散连续谱,具有清晰的上、下激发边界,其能量随磁场线性移动符合塞曼分裂预期的行为。该研究首次在稀土三角晶格磁体中通过场依赖的中子散射数据,直接支持了自旋子分数化激发的存在,尤其是揭示了在部分磁化状态下自旋子费米面的响应行为。这不仅为 YbMgGaO_4 的 QSL 态提供了强有力证据,也展示了中子散射在探测分数化激发中的独特能力,通过分辨激发谱的连续性和场致调制,可区分传统磁有序与量子自旋液体态。

2024 年 Yadav 等人^[44]通过非弹性中子散射研究了自旋轨道耦合驱动的阻挫量子磁体 Nd_3BWO_9 (NBWO)。通过非弹性中子散射实验精确解析了 Nd^{3+} 离子的晶体电场能级结构,观测到四个明确的晶体电场激发峰,通过蒙特卡洛拟合与磁化率数据交叉验证,确定基态与第一激发态能隙高达约 16 meV,这一大能隙证实了低温下体系退化为分离的 $J_{\text{eff}}=1/2$ 态,为量子涨落主导的基态行为提供了微观基础。以 Nd^{3+} 磁矩构成畸变笼目(kagome)晶格的阻挫磁体 NBWO 展示了畸变 kagome 晶格对量子态的稳定作用。该工作为稀土 kagome 材料设计提供了适度晶格畸变可能优于理想几何阻挫的新思路。

2024 年 Kelly 等人^[45]通过中子散射技术系统探究了六方晶系 $\text{Ba}_3\text{Tb}(\text{BO}_3)_3$ 在极低温下的磁特性。中子粉末衍射数据表明,在低至 75 mK 的极低温下均未观测到磁布拉格峰或显著磁漫散射,排除了材料在 mK 温区存在三维长程磁有序或自旋玻璃态冻结的可能性。非弹性中子散射数据表明,在 1.5 K 观测到的低能磁

激发峰通过点电荷模型拟合，成功解析了晶体场分裂。样品基态为单重态，两个晶体学独立的 Tb^{3+} 位点上各存在一个低激发双重态，且 Tb 离子均表现出弱单离子各向异性。此研究揭示了三角晶格几何阻挫与稀土离子晶体场效应共同作用下的特殊量子态，样品无磁有序基态的确立，为探索可能的量子自旋液体或新奇量子顺磁态提供了新方向。

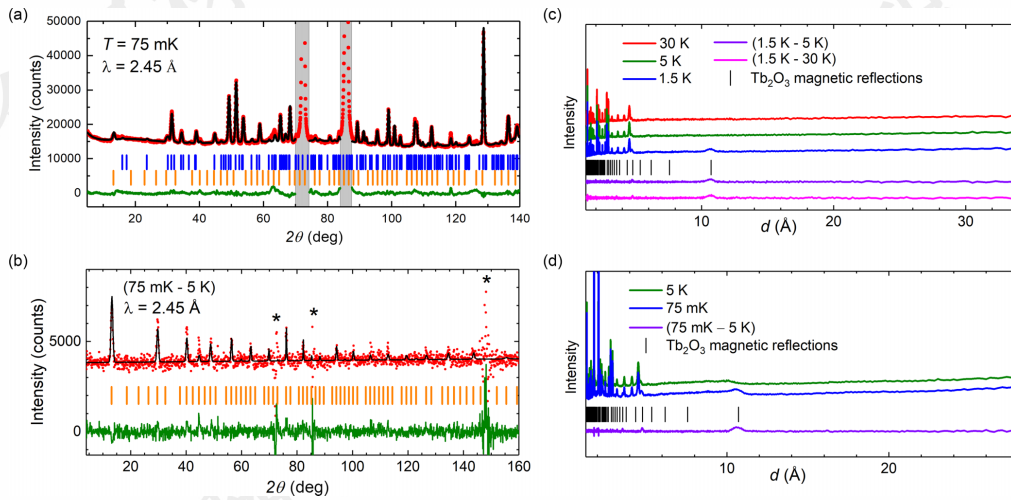


图 5 低温条件下 ($\lambda = 2.45 \text{ \AA}$) 采集的 $\text{Ba}_3\text{Tb}(\text{BO}_3)_3$ 粉末中子衍射数据。(a) $\text{Ba}_3\text{Tb}(\text{BO}_3)_3$ 在 75 mK 温度下的 PND 数据 Rietveld 精修结果。红色圆点为实测值，黑色曲线为计算值，绿色虚线表示差异值。(b) 稀释制冷机采集数据的差值谱(75 mK-5 K)的精修结果。(c) $T \geq 1.5 \text{ K}$ 采集数据及显示 Tb_2O_3 磁性峰的两个差异曲线。(d) $T \geq 75 \text{ mK}$ 采集数据及其差异曲线^[45]。

2024 年 Orlandi 等人^[46]通过包括单晶衍射、极化中子衍射、非弹性散射的综合中子散射技术系统研究了 zigzag 梯状结构化合物 SrTb_2O_4 的磁特性。中子衍射实验数据表明，在 35 mK 极低温下未检测到任何磁布拉格峰，排除了长程磁有序的存在。极化中子衍射显示仅有微弱弥散散射信号，表明基态仅存在短程自旋关联，且未观测到之前文献报道的磁峰。非弹性中子散射观测到 0.71 meV 和 1.42 meV 的准局域晶体场激发及 2.22 meV 的色散激子模，表明交换作用较弱且存在显著的晶体场-阻挫竞争。该研究说明 SrTb_2O_4 为稀土梯状化合物中罕见的阻挫诱导量子无序体系，这一发现不仅修正了先前认知，也为探索新型量子自旋液体提供了理想平台。

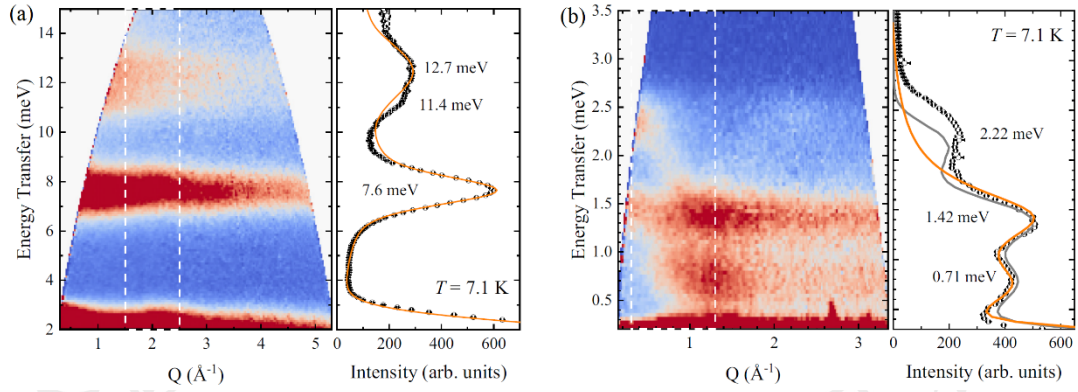


图 6 温度 7.1 K 下，(a)入射中子能量 $E_i=18$ meV 和 (b)入射中子能量 $E_i=7$ meV 的 SrTb_2O_4 粉末样品非弹性中子散射实验数据^[46]。

2025 年 Riordan 等人^[47]通过高分辨非弹性中子散射技术研究了量子偶极材料 $\text{Yb}:\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (YbGG) 在磁场下的磁激发行为。高分辨率单晶非弹性中子散射数据表明，在零场短程有序态下，观测到低能色散磁激发与连续谱散射共存，说明可能存在部分自旋冻结形成纳米尺度的自旋环的自旋泥浆态 (spin slush)，而其余自旋保持强量子涨落。在磁饱和态下，通过高分辨率单晶非弹性中子散射观测到了 YbGG 的双能带结构，证实其主导相互作用为长程偶极交换，这说明 YbGG 是典型的量子偶极磁体，其软模激发具有极强的鲁棒性。这些工作为理解阻挫磁体的磁热效应机制提供了微观依据，为下一代稀土磁致冷材料的设计指明了调控路径。

2025 年 Ma 等人^[48]针对三角晶格量子自旋液体候选材料的结构无序问题，通过非弹性中子散射研究了新型稀土化合物 $\text{Rb}_3\text{Yb}(\text{VO}_4)_2$ 。高分辨率中子散射实验发现，在 97 mK 超低温和 60 K 下对比弹性散射，样品磁布拉格峰完全缺失，尤其在磁有序典型信号区的小角度区域未检测到任何磁性衍射峰，排除了长程磁有序存在。非弹性中子散射实验在 0-2 meV 范围未观测到磁激发信号，既无磁有序自旋波，也无量子自旋液体分数化激发的连续谱，这一双无现象说明样品为量子无序基态。此研究确立了 $\text{Rb}_3\text{Yb}(\text{VO}_4)_2$ 为新型无结构无序量子自旋液体候选材料，其纯净晶格与可调层间距特性为探索二维三角晶格中的分数化激发如狄拉克费米子或自旋子费米面提供了理想载体。

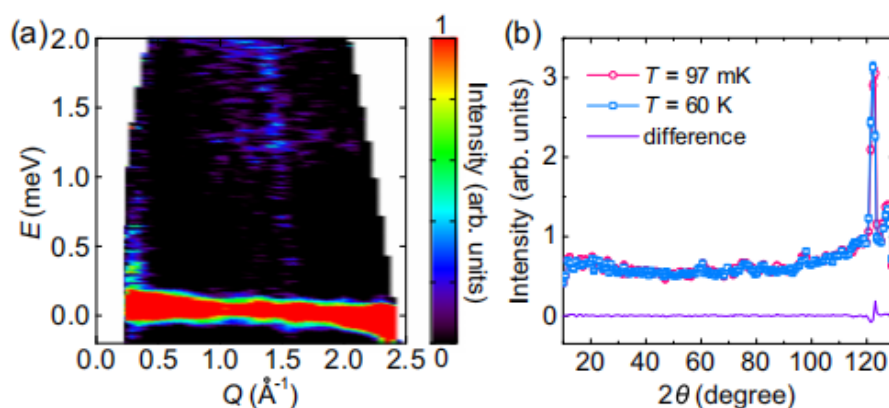


图 7 (a) 在 97 mK 温度下测量的 $\text{Rb}_3\text{Yb}(\text{VO}_4)_2$ 多晶样品非弹性中子散射谱。(b) 最低测量温度 97 mK 与最高温度 60 K 下的弹性中子散射数据^[48]。

在研究稀土阻挫磁体中因强自旋轨道耦合与几何阻挫导致的新奇物态时，中子散射不仅是表征磁结构的关键工具，更是辨析量子涨落、关联类型与激发谱的核心实验手段。2020 年 Sibille 等人^[49]利用多种中子散射技术研究了烧绿石结构的 $\text{Ce}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ ，非弹性中子散射精确测定了 Ce^{3+} 的晶体场能级，能量积分的中子衍射实验在高散射矢量区域观察到了明显的弥散散射信号，低能非弹性中子散射在 0.6 K 下观测到量子自旋液体中自旋子激发特征的连续激发谱，这些中子散射数据层层递进，从单离子态确认、静态关联模式到动态激发谱，说明了 $\text{Ce}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ 是具有拓扑纠缠与分数化激发的量子自旋液体态。2022 年 Arh 等人^[50]通过多种中子散射技术研究了 $\text{NdTa}_2\text{O}_{19}$ ，非弹性中子散射准确测定了 Nd^{3+} 离子的晶体场能级，发现其基态为 Kramers 双重态。在 40 mK 极低温下的中子衍射数据未见任何磁布拉格峰，直接证实了 $\text{NdTa}_2\text{O}_{19}$ 中长程磁有序的缺失。通过极化中子散射实验直接揭示了空间上的近邻伊辛型关联。这些说明稀土基三角晶格体系中具有接近伊辛极限的量子自旋液体态。2024 年 Okuma 等人^[51]通过中子衍射确定了 $\beta\text{-Na}_2\text{PrO}_3$ 中复杂的共线磁结构。利用非弹性中子散射测量了其具有能隙的色散自旋波，通过与自旋波计算的比对，证明了其磁序和能隙并非源于单离子各向异性，而是由键依赖的异向性交换作用所主导。这一研究突破了以往量子自旋液体主要局限于 4d、5d 过渡金属材料的局面。Ortiz 等人^[52]利用极化中子衍射、非弹性中子散射以及高场中子粉末衍射等多种手段研究了钷基烧绿石结构 $\text{Pr}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ 。高精度中子散射数据揭示了其低温态并非典型的经典量子自旋冰，而更接近一种保留了显著的量子涨落成分由缺陷或无序调制的部分冻结态。这为理解烧绿石结

构中量子自旋冰候选体的真实行为提供了关键实验依据。这些研究说明研究稀土阻挫材料时，中子散射具有不可或缺的作用。它不仅确定材料的微观磁相互作用，特别其对磁动力学和关联函数的直接测量能力，是其他实验手段难以替代的^[53]。

3.3 稀土低维磁体的序构调控与量子激发动力学

稀土低维磁体（二维层状/零维团簇）中，晶格序构与量子激发行为的深度耦合催生了丰富的量子物态。中子散射技术凭借其对核-磁结构协同解析及低能激发灵敏探测的优势，系统揭示了静态序构调控对磁基态的重构机制^[54]。2022年 Takagi 等人^[55]利用小角中子散射和极化中子散射研究了中心对称化合物 EuAl_4 ，在不同磁场下小角中子散射特征图样的演变，确定了样品各相中磁调制矢量的方向与大小，极化中子散射结果证实了在斯格明子相中自旋调制同时具有面内与面外分量。这些中子散射结果说明 EuAl_4 中具有方形与菱形两种纳米尺寸斯格明子晶格，突显了中子散射在解析非共线自旋织构与拓扑磁序中的不可替代作用。2024年 Zhang 等人^[56]综合运用弹性与非弹性中子散射研究了层状蜂窝结构反铁磁体 YbOCl 。非弹性中子散射测量获得的磁激发谱，通过与基于线性自旋波理论的模拟进行联合精修，确认了包括非对角项在内的全套交换参数。弹性中子散射在外场下的测量表明，仅约 0.3 T 的磁场即可压制长程反铁磁序，并在更高场下诱导出一个可能的自旋液体态，这为稀土低维磁体的量子涨落与场致相变提供了直接证据。2025年 Potashnikov 等人^[57]通过中子磁漫散射实验研究了稀土基纳米层状化合物 $(\text{Mo}_{2/3}\text{R}_{1/3})_2\text{AlCl}$ ($\text{R}=\text{Tb}, \text{Er}$)，区别于在磁有序温度以下测量布拉格峰和普通中子散射，中子磁漫散射技术是在略高于奈尔温度的顺磁态下测量源自短程磁关联的漫散射信号，通过对漫散射强度随动量变化的拟合，提取出实空间中多个配位壳层的海森堡交换常数，揭示相互作用随原子间距和晶体学方向的衰减与振荡行为。这为理解其磁有序起源和预测二维极限下的磁性提供了定量基础。这些工作共同构建了“晶格扰动→激发响应→量子功能”的跨尺度关联，使得稀土低维磁体中从微观交换机理到介观拓扑结构再到宏观量子相变的完整链条得以被精确揭示，推动了磁量子器件从现象发现向机理理解和可控设计的发展^[58]。

2020年刘向峰教授课题组^[59]通过中子散射技术研究了锂离子电池中典型富

锂锰基正极原始材料 $\text{Li}_{1.21}\text{Ni}_{0.28}\text{Mn}_{0.51}\text{O}_2$ (LR) 和将 Li_2ZrO_3 结构单元嵌入 Li_2MnO_3 域的合成改性材料 (LSLR)。中子衍射数据说明, Li_2ZrO_3 的引入导致相邻 Mn_2Li 层发生约 3° 滑移, Mn-O 键长从 1.918 \AA 显著延长至 1.946 \AA 。改性材料 LSLR 中 a 轴和 c 轴更大的晶胞参数产生了晶格畸变, 这种晶格畸变直接改变了活性氧的配位环境。中子散射数据通过中子对轻元素的敏感性避免了 X 射线对电子云的干扰, 实现了这一亚埃尺度的精确测量, 首次揭示了 MnO_6 八面体的显著扩张, 凸显其在解析材料微观机制中的独特优势。该工作对稀土磁性材料中类似晶格应变调控磁交换作用的策略具有启发意义。

2021 年 Watanabe 等人^[60]通过中子散射技术研究分析了双钙钛矿稀土磁性材料 SrLaCuSbO_6 (SLCSO) 和 SrLaCuNbO_6 (SLCNO) 的独特磁性质和其截然不同的自旋磁结构。中子粉末衍射数据表明, SLCSO 的二维层面磁结构为体心结构中以传播矢量 $\mathbf{k} = (1/2, 1/2, 0)$ 为特征的奈尔型反铁磁序, SLCNO 的二维层面磁结构为面心结构中由传播矢量 $\mathbf{k} = (-1/2, 1/2, 1/2)$ 为特征的柱状反铁磁序, 这说明 SLCSO 中近邻相互作用占主导地位, 而 SLCNO 中次近邻相互作用占主导。两种材料中均存在显著减小的有序磁矩, 这可归因于 Sr/La 位点无序引入的随机性增强的量子涨落效应。说明了在实际材料中即使微弱的晶格无序在存在阻挫的量子磁体中也能对基态性质产生深远影响, 压制经典有序并促进量子行为。此研究为理解无序和阻挫在接近量子临界点的二维量子磁体中的作用提供了重要范例。

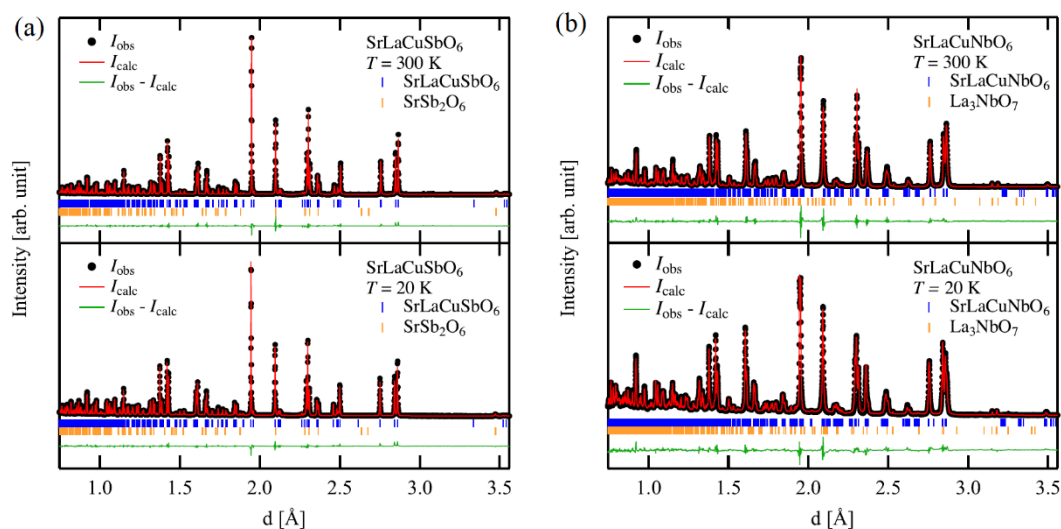


图 8 (a) 300 K 和 20 K 下 SLCSO 的中子粉末衍射数据。(b) 300 K 和 20 K 下 SLCNO 的中子粉末衍射数据。红色曲线为 Rietveld 拟合结果，绿色曲线为衍射强度与计算衍射强度的差值 [60]。

2024 年 Hase 等人 [61] 通过中子散射技术系统研究了 Yb_2SiO_5 中基于 Yb^{3+} 的独特四聚体磁基态及其激发行为。非弹性中子散射实验数据表明，在 1.8 K 下观测到三个色散极弱的激发峰 (0.7 meV, 1.2 meV, 1.9 meV)，这些激发覆盖范围分布明确指向局域团簇激发特性，激发峰强度的温度依赖性表明这三种激发均为磁性激发从而排除了样品的孤立二聚体假设，确定 Yb_2SiO_5 中的自旋系统是具有 $J_1 = 0.74$ meV 和 $J_2 = 0.95$ meV 两种交换相互作用的 $S_{\text{eff}} = 1/2$ 反铁磁四聚体。该工作不仅丰富了稀土量子磁体的相图，更说明了中子散射在破解复杂磁构型中的核心地位，为探索四聚体系统中的新奇量子现象，如磁场诱导玻色-爱因斯坦凝聚奠定了基础。

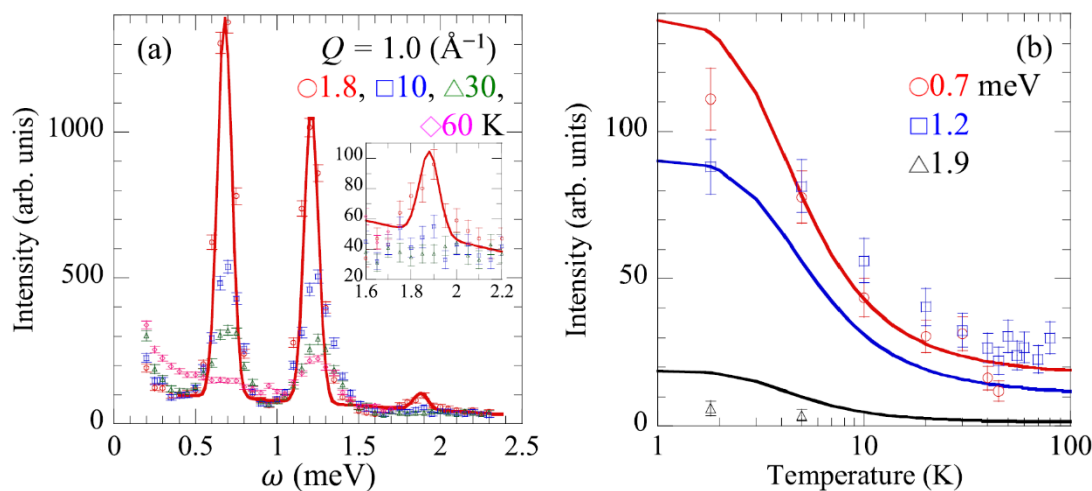


图 9 (a) 不同温度条件下， Yb_2SiO_5 粉末样品非弹性中子散射强度 $I(\omega)$ 随能量转移 ω 的变化关系。(b) $\omega = 0.7$ 、1.2 和 1.9 meV 激发峰的积分强度随温度 T 的变化关系 [61]。

2024 年 Pan 等人 [62] 通过中子散射技术研究了新型二维三角晶格材料 $\text{CeTa}_7\text{O}_{19}$ 的结构与磁学特性。此研究通过非弹性中子散射技术对 $\text{CeTa}_7\text{O}_{19}$ 的晶体场能级进行了精确测定，在 140 meV 入射中子能量下，在 6.5 K 低温下观测到位于 42.9 meV 和 67.1 meV 的两个平带激发峰，扣除非磁性同构物 $\text{LaTa}_7\text{O}_{19}$ 的声子背景并结合散射强度随动量转移的衰减，证实了这两个激发源于 Ce^{3+} 的晶体场跃迁。此工作通过非弹性中子散射精确测定晶体场能级到解释磁化率数据的完整链条，说明了中子散射在解析稀土各向异性微观机制中的不可替代性。该研究不仅丰富了三角晶格量子磁体材料，更通过高精度中子散射揭示了稀土离子的晶体场效应对宏观磁性的决定性作用，为设计新型量子材料和稀土磁致冷材料提供了理论及实验基础。

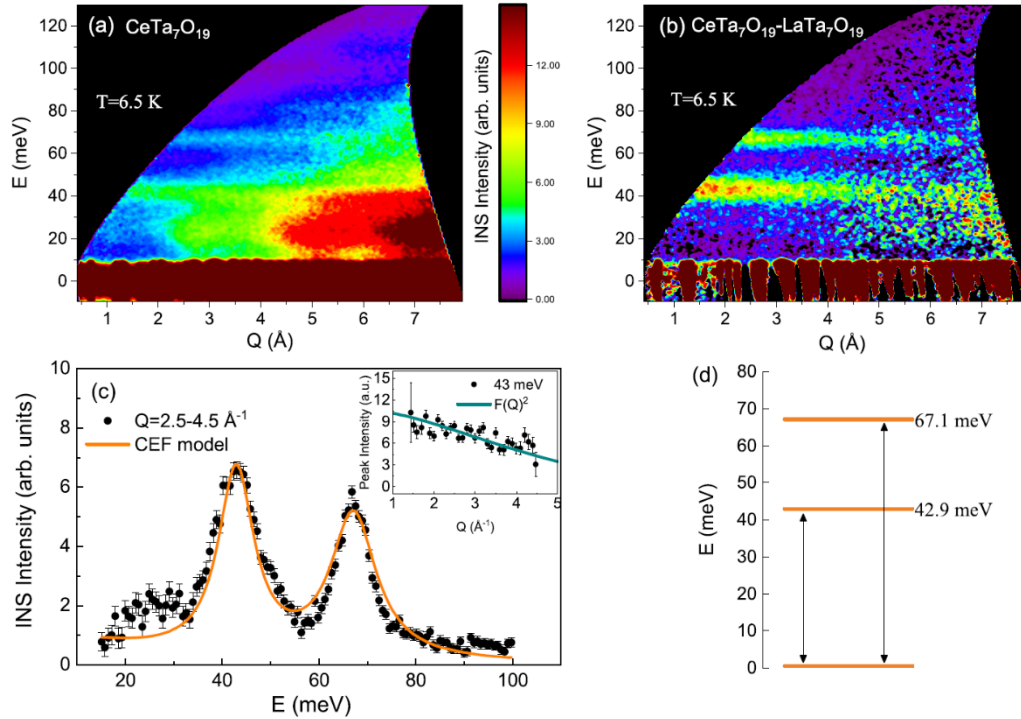


图 10 (a) 140 meV 入射中子能量下 $\text{CeTa}_7\text{O}_{19}$ 粉末样品的非弹性中子散射谱。(b) 测量无磁类似物 $\text{LaTa}_7\text{O}_{19}$, 扣除声子贡献及其他背景散射后得到的非弹性中子散射谱。(c) 将(b)中的非弹性中子散射数据在 $2.5\text{-}4.5 \text{ \AA}^{-1}$ 动量转移范围内积分得到的能谱。(d) Ce^{3+} 基态多重态的晶体场劈裂示意图^[62]。

2024 年 Mori 等人^[63]通过中子散射技术研究了 $\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (TbIG) 中自旋塞贝克效应的反常磁场增强行为。中子散射数据表明, 在 TbIG 中观测到无法通过光学光谱准确获取的 3 meV、6 meV 和 10 meV 低能激发峰, 这是因为光学跃迁受电偶极选择定则限制, 而中子散射直接探测磁偶极跃迁, 对晶体场分裂敏感。中子散射实验的贡献不仅体现在参数标定上, 更关键的是揭示了晶体场与自旋流的关联机制, 晶体场激发降低直接增大了低能激发的态密度, 进而通过自旋流注入机制增强自旋塞贝克效应。此工作通过中子散射驱动的多尺度建模, 解决了 TbIG 中自旋塞贝克效应低温反常增强的长期争议, 这证实了稀土离子低能晶体场激发可作为自旋流的有效载体, 突破了传统磁振子主导的运输图像, 对稀土基自旋电子学器件的设计与优化具有普适意义。

2025 年 Telford 等人^[64]通过中子散射技术研究了 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Fe}_{1-y}\text{Mn}_y\text{O}_{3-\delta}$ 在氧化还原过程中的晶体结构变化。高分辨中子粉末衍射数据表明, 氧化态样品的结构为菱方晶系, 还原态样品的 Fe-O 峰在 2.1 \AA 处出现显著展宽和肩峰, 说明氧空

位诱导的配位多面体畸变为立方晶系。变温中子衍射数据说明还原态样品的奈尔温度高于氧化态样品，这与它们的 Fe^{3+} 含量一致，所有磁有序样品均呈现反铁磁序，磁矩大小与价态一致。此工作说明了中子散射技术是解析复杂氧化物局域无序与磁有序耦合的关键工具，实现了磁性与核结构的协同拟合，为理解自旋-晶格耦合提供了新途径，为稀土磁性氧化物的缺陷工程与性能优化提供了深层次的结构依据。

4. 总结与展望

本文总结了近年来利用中子散射技术研究稀土磁性材料复杂磁结构方面的最新进展。得益于三轴谱仪、飞行时间谱仪以及极化中子技术的持续发展，极化中子反射技术成功揭示了界面磁性，而飞行时间谱仪的高分辨率则为解析稀土化合物中的非共线磁结构、阻挫磁序及磁振子能带提供了不可替代的实验作用。研究者得以在动量与能量空间精准探测稀土离子的自旋排列、磁激发谱及磁相变动力学。

尽管中子散射技术在稀土磁结构研究中展现出强大能力，其进一步发展仍面临多重挑战，需在技术革新、方法融合等方面继续突破。例如极化中子技术深度开发与极端条件联用，实现对稀土磁相变微观机制的动态捕捉，同步发展针对微小样品如纳米磁体的微区极化中子表征方法，揭示界面磁耦合与尺寸效应的量子起源。通过人工智能驱动的高通量数据分析与多尺度模拟融合，推动中子数据与第一性原理计算、原子尺度磁动力学模拟及宏观磁性能预测的深度耦合，构建“中子表征-理论建模-材料设计”闭环，加速新型稀土磁性材料的理性探索。系统整合中子散射与洛伦兹电镜、 μ 子自旋弛豫等互补技术，实现对稀土离子价态、轨道磁矩、自旋序参量以及局部磁环境的同步测定，从而在跨尺度上建立从微观磁结构到宏观磁性能的完整物理图像。随着国内大科学装置性能的持续跃升，中子散射有望在稀土量子磁体、高性能永磁材料微观机制、磁制冷工质相变动力学及低维自旋电子学材料界面磁性等前沿领域取得关键突破，为下一代磁性功能材料的设计与制备奠定坚实的科学基础。

参考文献

- [1] Coey J M D. *Rare-earth iron permanent magnets*[D]. Oxford University Press, 1996
- [2] Santini P, Carretta S, Amoretti G *et al. Reviews of Modern Physics*[J], 2009, 81: 807
- [3] Tokura Y, Kanazawa N. *Chemical Reviews*[J], 2021, 121: 2857
- [4] Ding S L, Kang M G, Legrand W *et al. Physical Review Letters*[J], 2024, 132: 236702
- [5] Swamynadhan M J, O'Hara A, Ghosh S *et al. Advanced Functional Materials*[J], 2024, 34: 2400195
- [6] Liang Wenhui(梁文慧), Wang Yutong(王雨桐), Su Jian(苏鉴) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(2): 345
- [7] Tai D Q, Li B, Xue H Y *et al. Acta Materialia* [J], 2024, 262: 119411
- [8] Liu D, Liu Z, Zhang J *et al. Research*[J], 2023, 6: 0082
- [9] Wang Mei(王美), Liu Weiming(刘伟明), Peng Buzhuang(彭步庄) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2025, 54(11): 2768
- [10] Fu H, Jiang Y, Zhang M *et al. Chemical Society Reviews*[J], 2024, 53: 2211
- [11] Faure Q, Takayoshi S, Petit S. *Nature Physics*[J], 2018, 14: 716
- [12] Santini P, Carretta S, Amoretti G. *Reviews of Modern Physics*[J], 2009, 81: 807
- [13] Lian Xili(连昕丽), Zhou Jianjun(周建军), Li Shilin(李仕林) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(3): 660
- [14] Liu Dan(刘丹), Li Yuan(李渊), Sun Ruoxuan(孙若瑄) *et al. Acta Physica Sinica*(物理学报)[J], 2025, 74: 137102
- [15] Li Minmin(李敏敏), Zuo Jianhua(左建华), Hou Yongjie(侯永杰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(8): 2732
- [16] Liu D, Song J, Liu Z *et al. Materials & Design*[J], 2025, 251: 113710
- [17] Shull C G, Smart J S. *Physical Review*[J], 1949, 76: 1256
- [18] Banerjee A, Yan J, Knolle J *et al. Science*[J], 2017, 356: 1055
- [19] Loong C K, Vashishta P, Kalia R K *et al. Physical Review Letters*[J], 1989, 62: 2628
- [20] Gaskell P H, Saeed A, Chieux P *et al. Physical Review Letters*[J], 1991, 67: 1286
- [21] Janik J A. *Advances in Liquid Crystals*[J], 1982, 5: 215
- [22] Besnard M, Dianoux A J, Lalanne P *et al. Journal of Physics* [J], 1977, 38: 1417
- [23] Coldea R, Tennant D, Wheeler E. *Science*[J], 2010, 327: 177
- [24] Tian Q, Yan G, Bai L *et al. Journal of Applied Crystallography*[J], 2018, 51: 1662
- [25] Liu D, Song K, Chen W *et al. Nuclear Analysis*[J], 2022, 1: 100011
- [26] Keiderling U. *Applied Physics A*[J], 2022, 74: 1455
- [27] Tranquada J, Xu G, Zaliznyak I. *Journal of Magnetism And Magnetic Materials*[J], 2014, 350: 148
- [28] Furrer A, Mesot J, Strässle T. *Neutron Scattering in Condensed Matter Physics (Vol. 4)*[D] Singapore: World Scientific, 2009
- [29] Xu J, Xia Y, Li Z *et al. Nuclear Instruments And Methods in Physics Research Section A*[J],

2021, 1013: 165642

- [30] Yano N, Yamada T, Hosoya T *et al. Scientific Reports*[J], 2016 6: 36628
- [31] Azadmanesh J, Lutz W, Coates L *et al. Nature Communications*[J], 2012, 12: 2079
- [32] Clark L, Sala G, Maharaj D D *et al. Nature Physics*[J], 2019, 15: 262
- [33] Gardner JS, Ehlers G, Faraone A *et al. Nature Reviews Physics*[J], 2020, 2: 103
- [34] Rai B K, Pokharel G, Arachchige H S *et al. Physical Review B*[J], 2021, 103: 014426
- [35] Lin Z, Zha L, Wang F *et al. Acta Materialia*[J], 2020, 200: 502
- [36] Provino A, Ritter C, Smetana V *et al. Inorganic Chemistry*[J], 2021, 60: 16397
- [37] Siebeneichler S, Ovchinnikov A, Bosch-santos B *et al. Scientific Reports*[J], 2022, 12: 9248
- [38] Arai Y, Kuroda K, Nomoto T *et al. Nature materials*[J], 2022, 21: 410
- [39] Kish L L, Weichselbaum A, Pajeroski D M *et al. Nature Communications*[J], 2025, 16: 6094
- [40] Shoup J E, Borchers J A, Charlton T R *et al. Physical Review materials*[J], 2025, 9: 086001
- [41] Kapoor R, Diaz J R, Yahne D R *et al. Physical Review B*[J], 2025, 112: 224410
- [42] Passos F A, Nilsen G J, Patrick C E *et al. Physical Review B*[J], 2023, 108: 174409
- [43] Shen Y, Li Y D, Walker H C *et al. Nature Communications*[J], 2018, 9: 4138
- [44] Yadav A, Elghandour A, Arh T *et al. Physical Review B*[J], 2025, 111: 094408
- [45] Kelly N D, Le M D, Sheptyakov D *et al. Physical Review B*[J], 2025, 111: 054427
- [46] Orlandi F, Hatnean M C, Mayoh D A *et al. Physical Review B*[J], 2025, 111: 054415
- [47] Riordan E, Hatnean M C, Balakrishnan G *et al. Physical Review B*[J], 2025, 111: 214419
- [48] Ma Z, Chen Y, Fu Z *et al. Physical Review B*[J], 2025, 111: 155141
- [49] Sibille R, Gauthier N, Lhotel E *et al. Nature Physics*[J], 2020, 16: 546
- [50] Arh T, Sana B, Pregelj M *et al. Nature materials*[J], 2022, 21: 416
- [51] Okuma R, Farquharson K, Johnson R D *et al. Nature Communications*[J], 2024 15: 10615
- [52] Ortiz B R, Sarte P M, Pokharel G *et al. Physical Review B*[J], 2024, 109: 134420
- [53] Zheng S Y, Wo H L, Gu Y Q *et al. Physical Review B*[J], 2023, 108: 054435
- [54] Szabo A, Orlandi F, Manuel P. *Physical Review letters*[J], 2022, 129: 247201
- [55] Takagi R, Matsuyama N, Ukleev V *et al. Nature Communications*[J], 2022, 13: 1472
- [56] Zhang Z, Cai Y Z, Jiao J L *et al. Physical Review Research*[J], 2024, 6: 033274
- [57] Potashnikov D, Caspi E N, Tao Q Z *et al. Physical Review B*[J], 2025, 112: 064407
- [58] Khatua J, Bhattacharya S, Ding Q P *et al. Physical Review B*[J], 2022, 106: 104404
- [59] Zhang J, Zhang Q, Wong D *et al. Nature Communications*[J], 2021, 12: 3071
- [60] Watanabe M, Kurita N, Tanaka H *et al. Physical Review B*[J], 2022, 105: 054414
- [61] Hase M, Kaneko K, Tabata C *et al. Physical Review B*[J], 2025, 111: 094403
- [62] Pan F, Sun S, Kolesnikov A I *et al. Physical Review B*[J], 2024, 110: 174448
- [63] Mori M, Tomasello B, Ziman T. *Physical Review B*[J], 2025, 111: 014407
- [64] Telford D M, Hu W, Metcalfe I S *et al. Chemistry of Materials*[J], 2025, 37: 3471

Progress in neutron studies on the magnetic structures of rare earth magnetic materials

Liu Dan ^{1*}, Ren Jianyu ¹, Chen Weiqiang ¹, Zheng Yusha ¹, Qi Xing ¹, Xi Jianfeng ^{1*}

(1. Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: Rare-earth magnetic materials hold an indispensable strategic position in high-tech fields such as permanent magnets and magnetic refrigeration, owing to the unique characteristics of their $4f$ electrons: strong spin-orbit coupling, high atomic magnetic moments, and rich electronic energy levels. The multifaceted competitive mechanisms among electron exchange interactions, magnetic multipolar interactions, and crystal field effects in these materials present fundamental challenges to elucidating magnetic phase transition mechanisms and quantum excitation behaviors. Neutron scattering technology, distinguished by its sensitivity to magnetic moments, exceptional penetration capability, and ability to distinguish light elements, serves as a pivotal technique for revealing the microscopic mechanisms of magnetic structures in rare-earth systems. This technique has achieved breakthrough progress in areas including coercivity optimization of rare-earth permanent magnets and regulation of the magnetic entropy change in magnetocaloric materials. This article systematically reviews the fundamental principles and methodologies of neutron scattering technology alongside its cutting-edge applications in investigating magnetic structures within rare-earth magnetic materials, including rare-earth-transition-metal compounds, rare-earth frustrated magnets, and rare-earth low-dimensional magnets. The review aims to provide a foundational reference for advancing research on magnetic structures in rare-earth systems.

Keywords: rare-earth materials, neutron scattering, magnetic structures, magnetic materials

* Corresponding author. E-mail: xijf@btbu.edu.cn