

中子散射在新型磁性材料研究中的应用

王芳卫

(中国科学院物理研究所 中国散裂中子源靶站谱仪工程中心, 北京 100190)

摘要: 简单介绍了中子散射在具有一级晶格和磁相变的新型磁制冷材料和具有庞磁致电阻材料中的一些研究进展。中子散射结果表明, 在 NaZn_{13} 型稀土铁基化合物中, 晶格与磁性之间存在明显的耦合, 这种耦合可能是该体系中大的磁熵变的来源; 在 CMR (Colossal Magnetoresistant) 锰氧化物中, 极化中子衍射证明 3d 电子的轨道分布与 Jahn-Teller 效应、磁有序等密切相关, 并在该体系中, 首次测量到纳米尺度的磁性材料中的自旋波。

关键词: 中子散射; 极化中子衍射; 磁制冷材料; 磁熵变; 磁致电阻材料

中图分类号: O571.56; O722⁺.7 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2009)12-0021-05

Application of Neutron Scattering for New Magnetic Material Studies

WANG Fangwei

(Engineering Center for Target Station and Spectrometers of Chinese Spallation Neutron Source,
Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The results of neutron scattering from the novel magnetic refrigerant materials with the first-order phase transition and the colossal magnetoresistant (CMR) materials are summarized. In NaZn_{13} -type rare-earth iron compounds, a strong interplay between lattice and magnetism, derived from neutron diffraction, gives rise to large magnetic entropy change. In the CMR manganites, 3d electronic orbital occupancies, simulated by polarized neutron diffraction data, are significantly coupled with Jahn-Teller effect and magnetic order, and the spin waves in nano magnetic clusters are further mapped out for the first time by inelastic neutron scattering.

Key words: neutron scattering; polarized neutron diffraction; magnetic refrigerant materials; magnetic entropy change; magnetoresistant materials

1 前言

人类在原子尺度上对物质结构的认识可追溯到上世纪初, 德国物理学家劳厄和英国物理学家布拉格父子以其敏锐的物理思想, 创造性地发明了 X 射线衍射技术, 打开了探索微观世界的大门, 使人们能够测量而不是推测物质中原子的排列规律, 如原子间的距离和其空间位置之间的关系。

热中子 (Thermal Neutron) 的波长与物质中原子的间距相当, 可以象 X 射线一样用来探测物质的微观结构。

但是, 与 X 射线相比, 中子具有一些明显的不同点, 如中子更容易精确确定轻原子的位置, 可以区分同位素等。最具特色的是中子有自旋, 可以与原子核外未成对电子的自旋相互作用, 成为研究磁性 (包括超导) 及相关材料中磁的微观对称和运动特征, 理解材料中磁相互作用变化与材料性能的重要工具^[1]。目前, 中子衍射仍然是确定各类型磁性材料中磁的长程序结构的唯一工具。

2 中子散射技术

中子散射技术的实质就是通过测量中子束与物质相互作用后在各个不同方向散射出来的中子数目及其能量和动量的变化, 来反应和得到研究对象的微观对称和相互作用等重要信息, 即:

$$I(Q, E) = \iint R(Q - Q', E - E') S(Q', E') dQ' dE'$$

式中, $I(Q, E)$ 即为测量的中子散射强度, $S(Q, E)$ 描述研究对象对中子的散射函数。 $R(Q - Q', E - E')$ 为中

收稿日期: 2009-10-28

基金项目: 国家自然科学基金 (10375088, 2006CB601101, 10974244); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (KJXC2-SW-W07); 国家重点基础研究发展计划 (2010CB833102) 资助

通信作者: 王芳卫, 男, 1967 年生, 研究员, 博士生导师

子散射仪器分辨率函数,所表达的物理意义是:当谱仪被设定测量动量转移为 Q , 能量转移为 E 的散射过程时,在相近的动量、能量空间($\Delta Q = Q' - Q$, $\Delta E = E' - E$)中探测到中子的概率。通常,中子散射可简单地分为弹性散射和非弹性散射。除研究其原子位置和运动外,针对磁性材料,弹性散射主要用于研究原子尺度上的磁矩的大小、方向和长程序;非弹性散射主要研究原子磁矩之间的相互作用。中子弹性散射技术包括粉末衍射技术、单晶衍射技术、小角散射技术甚至中子反射技术;非弹性散射技术最有代表性的为三轴技术和飞行时间技术。对于磁性材料,磁散射信息与原子核的散射信息被同时探测到,当磁散射信号较弱时,为从原子核散射中甄别出磁散射信号,在以上谱仪技术的基础上,使用中子极化技术。磁的中子散射存在形状因子,因此磁性中子散射实验通常要求使用低能量、长波长的中子^[1-3]。

3 新型室温磁制冷材料的中子衍射

铁磁体在绝热磁化和退磁过程中温度会发生改变,这一现象称为磁热效应。磁热效应自 1881 年发现以来,利用绝热退磁技术获得超低温得到广泛应用^[4-6]。室温磁制冷技术,因其绿色环保和高效节能,具有巨大的潜在应用市场。室温磁制冷的研究主要集中在两个方面:新型室温磁制冷材料的研发和室温磁制冷样机的研制。以探索高效磁制冷工质为目的,室温磁制冷材料的研究与探索始终为人们所关注。1976 年, Brown 发现稀土金属 Gd 的磁热效应(5 T 磁场下的磁熵变为 9.8 J/kg·K)。美国宇航公司采用超导磁体,以金属 Gd 为磁制冷工质首次实现了实验室室温磁制冷,制冷温跨为 80 K,显示了室温磁制冷技术实际应用的可能性^[7-8]。之后,大量磁性材料的磁热效应被广泛研究,但均小于 Gd,因此,稀土金属 Gd ($T_c = 293$ K)被认为是室温区唯一可被利用的磁制冷工质。直至 1990 年代后期,一系列研究揭示了一级相变体系作为磁致冷材料的巨大潜力。1997 年,美国 Ames 实验室在一级相变体系 $Gd_5Si_2Ge_2$ 中观察到 18 J/kg·K 的巨大磁熵变,随后的进一步研究证实这类材料具有优于 Gd 的绝热温度变化^[9-10]。然而,巨磁熵 $GdSiGe$ 合金的制备需要 Gd 具有异常高的纯度,这使其价格依然昂贵。1998 年起,中科院物理研究所沈保根研究员领导的研究小组对稀土-过渡族金属间化合物的磁热效应开展了系统的研究,并发现 $La(Fe, Si)_{13}$ 基金属间化合物,5 T 磁场变化下室温磁熵变达到 20 J/kg·K,是稀土金属钆磁熵变的 2 倍以上^[11-13]。

越来越多的证据显示, $La(Fe, Si)_{13}$ 体系中,大的磁熵变可能来源于磁有序改变时所伴生的大的晶格效

应。换句话说,磁与晶格存在较强的关联。中子衍射被用来同时测定磁与晶格的微观结构随温度的演化,从而确定磁与晶格相变等一些微观特征^[14]。图 1 为 $LaFe_{11.4}Si_{1.6}$ 在 2 K 下的中子衍射图及 Rietveld 精修结果(插图为化合物的晶体结构)。晶胞内的所有自旋都呈铁磁性排列, Fe^I 位的磁矩值略小于 Fe^{II} 。这种长程的铁磁有序导致了在居里温度附近晶格的显著膨胀和大体积相与小体积相的共存。即便是在铁磁态,晶格膨胀与自发磁化强度有着密切的关联,磁弹性耦合常数为 $1.14 \times 10^{-8} \text{ cm}^6 \cdot \text{emu}^{-2}$, 如图 2 所示。通过对 Fe-Fe 键长随温度的变化关系分析,我们认为由二十面体构成的团簇间的 Fe-Fe 交换作用与团簇内部的 Fe-Fe 交换作用一样都对 $La(Fe_{1-x}Si_x)_{13}$ 的磁性起着重要的作用。

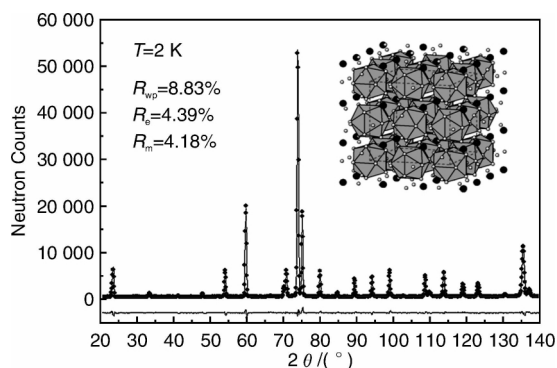


图 1 $LaFe_{11.4}Si_{1.6}$ 在 2 K 下的中子衍射图及 Rietveld 精修结果
Fig. 1 Rietveld refinement of neutron diffraction data of $LaFe_{11.4}Si_{1.6}$ at 2 K

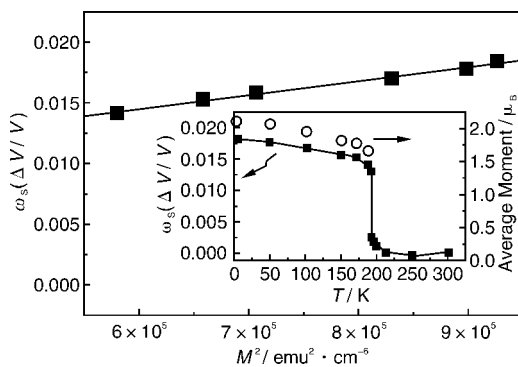


图 2 铁磁有序时,晶胞膨胀 $\omega_s [= \Delta V/V(300 \text{ K})]$ 与自发磁化强度的关系。插图为 ω_s 和自发磁化强度随温度的变化

Fig. 2 The unit cell expansion $\omega_s [= \Delta V/V(300 \text{ K})]$ as a function of spontaneous magnetization. Inset: the temperature dependence of ω_s and magnetization

对少量 Co 替代的真正具有室温磁制冷材料 $La(Fe_{11.3}Co_{0.6}Si_{1.1})$ ($T_c = 274$ K, 5 T 磁场下的磁熵变峰值为 19.7 J/kg·K), 中子衍射给出同样的结果^[15]。说明这种晶格与磁有序之间的耦合在该体系中普遍存在。

同时, 对另一类新型大的磁熵变材料 $\text{Mn}_{1.1}\text{Fe}_{0.9}(\text{P}_{0.8}\text{Ge}_{0.2})$, 粉末中子衍射发现在磁有序相变过程中, 磁有序相和顺磁相共存, 磁场驱动, 使顺磁相转化为此有序相可能就是大的磁熵的微观起源^[16]。在这一转变过程中, 晶格没有明显的变化, 但 P, Ge 在此有序相和顺磁相中的含量却存在较大变化。

4 CMR 材料锰氧化物的中子散射

继发现金属磁性 Fe/Cr 超晶格样品的电阻率随磁场增加而下降所表现出巨磁致电阻效应 (GMR) 之后, 掺杂锰氧化物在外磁场下所表现的超大磁致电阻 (CMR) 引起了巨大的反响。因为这一发现不仅将巨磁致电阻效应的研究由金属、合金, 推广到氧化物材料, 而且近 100% 的自旋极化率可能使该类化合物成为自旋电子学的基础材料之一^[17]。

总的来说, 这些锰氧化物是一类典型的电子强关联系统, 具有奇特的电子输运和自旋输运特性。在这类电子强关联体系中同时存在着电荷序、自旋序和轨道序, 它们相互耦合也相互竞争。从根本上可以说自旋和轨道相互作用是导致掺杂稀土锰氧化物中的超大磁致电阻的直接原因^[18]。基于该相互作用的理论模型对锰氧化物中的大部分的物理现象给出了合理的解释, 但正是中子散射实验从各个方面为这些理论提供了大量的实验验证。

首先, 中子的粉末衍射, 不仅很好地确定了体系中各种结构相变和磁相变^[19], 同时还利用新发展起来的非完整晶格的原子对函数技术, 很好地研究了体系中 MnO_6 八面体的畸变^[20]。实验发现, MnO_6 八面体畸变并不完整地遵循双交换模型, 还包含 Jahn-Teller 束缚小极化子的贡献。

小角中子散射研究表明^[21-22], 在此相变的过程中, 磁的长程序逐渐断裂成为纳米磁性团簇, 这些纳米团簇在外磁场作用下, 迅速长大, 最终形成铁磁长程序, 使电子的无序散射急剧下降, 从而获得大的磁电阻效应。通过与国外中子散射实验 LLB 合作, 我们对单晶 $(\text{La}, \text{Sr}/\text{Ca})\text{MnO}_3$ 在欠掺杂的金属绝缘体转变区域, 进行了非弹性中子散射研究^[23-24]。实验上, 第一次测量到铁磁纳米团簇的自旋波特性: 内禀的电子相分离造成了体系自旋波被一些分离的“能级”所替代, 如图 3 所示。从这些分离的能级中, 可知体系的铁磁纳米团簇尺寸为 $\sim 1 \text{ nm}$, 磁矩之间的相互作用存在各项异性, 在 Jahn-Teller 畸变较小的 ab 面内的交换作用能 J_{ab} , 随空穴浓度增加变化不大, 从母体 LaMnO_3 的 $\sim 0.8 \text{ meV}$ 增加至完全金属态的 $\sim 1.1 \text{ meV}$, 而 c 方向却从母体的反铁磁相互作用 $J_c \sim -0.6 \text{ meV}$ 转变为各项同性铁磁金属态的 $\sim 1.1 \text{ meV}$ 。

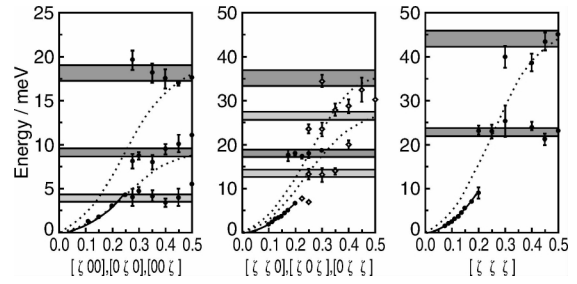


图 3 $(\text{La}_{0.8}\text{Ca}_{0.2})\text{MnO}_3$ 的三个不同方向的自旋波色散

Fig. 3 The dispersions of spin waves in $(\text{La}_{0.8}\text{Ca}_{0.2})\text{MnO}_3$ at thress tyipcal directions

极化中子衍射不仅是求解磁性材料磁结构的有效工具, 同时还能获得材料中原子磁矩在空间中的分布, 进而利用多极点模型, 间接求解未成对的 3d, 4f 电子的轨道分布。 $(\text{La}_{0.4}\text{Pr}_{0.6})_{1.2}\text{Sr}_{1.8}\text{Mn}_2\text{O}_7$ 单晶样品的极化中子衍射分析显示, 在 $[110]$, $[001]$ 两不同方向的外磁场分别诱发两种不同的外场诱导的绝缘顺磁态到铁磁金属态的一级相变。通过最大熵方法 (MEM: Maximum Entropy Method) 确定磁化强度密度的 3 维空间分布, 得到 2 K 时 $[010]$ 方向投影的磁化密度分布, 如图 4 所示。磁场平行 ab 面的 FIM (Field-Induced Ferromagnetic Metal) 状态, 其磁化强度密度都分布在 Mn 原子位; 磁场垂直 ab 面的 FIM 状态, 其磁化强度密度除了分布在 Mn 原子位外, 在 Sr_2 位也有分布。在两个方向上分别施加低于临界磁场的 5.0 T, 4.5 T 磁场, 也观察到类似的结果。通过多极点模型计算得到: 在两种 FIM 状态中, Mn 位 t_{2g} 电子自旋占总自旋的 $\sim 70\%$ 。FIM (ab) 态中, e_g 电子 $d_{x^2-y^2}$ 轨道占有率略高于 $d_{3z^2-r^2}$ 轨道, 分别为 14%, 11%; 而 FIM (c) 态中, e_g 电子 $d_{x^2-y^2}$ 轨道占有率低于

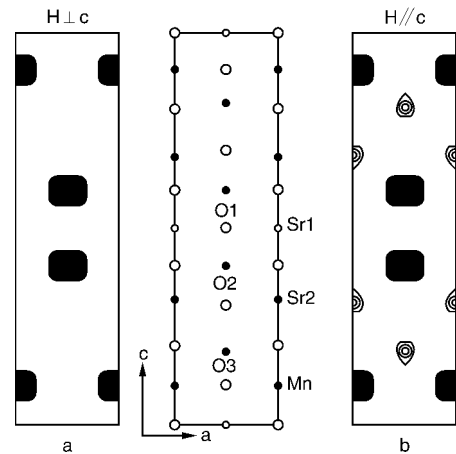


图 4 不同外磁场下, $(\text{La}_{0.4}\text{Pr}_{0.6})_{1.2}\text{Sr}_{1.8}\text{Mn}_2\text{O}_7$ 磁化强度的密度空间分布

Fig. 4 Mangetization density of $(\text{La}_{0.4}\text{Pr}_{0.6})_{1.2}\text{Sr}_{1.8}\text{Mn}_2\text{O}_7$ at different applied magnetic fields

$d_{3z^2-r^2}$ 轨道, 分别为 9%, 20%。同时, $d_{3z^2-r^2}$ 轨道电子的增加使 MnO_6 八面体在晶胞 c 方向的畸变增大^[25-26]。由些可见, 外磁场不仅改变了 Mn 离子的磁矩取向, 同时还改变锰离子的 e_g 电子的轨道分布, 造成不同的局域晶格畸变。

同样, 非弹性中子散射也被用来测定该体系中自旋波的色散^[27-28], 获得材料在 ab 面内磁矩相互作用能 $J_{ab} \sim 3.5 \text{ meV}$, 而晶格 c 方向的相互作用能 $J_c \sim 0.7 \text{ meV}$ 。两方向的磁相互作用强度相差近 5 倍, 表现出明显的各向异性。

5 结 语

当前, 与磁性相关的新材料很多, 本文仅以磁制冷材料和庞磁致电阻材料的中子散射研究结果为例, 说明中子散射是探测材料中磁结构和磁相互作用的有力工具。中子散射研究结果可以帮助人们建立微观磁特性与宏观磁性的联系, 服务于高性能、新型磁性材料的研发。

6 致 谢

感谢为作者提供中子散射研究对象的中国科学院物理研究所磁学国家重点实验室的沈保根、胡凤霞研究员, 以及法国 LLB 中子散射研究室的合作者 Gukasov A, Moussa F, Hennion M 和 Kurbakov A 博士。

参考文献 References

- [1] Sköld K, Price D L. *Methods of Experimental Physics Vol. 23: Neutron Scattering*[M]. London: Academic Press INC, 1988.
- [2] Windsor C G. *Pulsed Neutron Scattering*[M]. London: Taylor & Francis LTD, 1981.
- [3] Furrer A, Mesot J, Strassle T. *Neutron Scattering in Condensed Matter Physics*[M]. Singapore: World Scientific, 2009.
- [4] Warburg E. Magnetische Untersuchungen[J]. *Ann Phys Chem*, 1881, 13: 141-146.
- [5] Debye P. Einige Bemerkungen zue Magnetisierung bei tiefer Temperatur[J]. *Ann Physik*, 1926, 81: 1 154-1 160.
- [6] Giauque W F. A Thermodynamic Treatment of Certain Magnetic Effects[J]. *J Am Chem Soc*, 1927, 49: 1 864-1 870.
- [7] Brown G V. Magnetic Heat Pumping near Room Temperature[J]. *J Appl Phys*, 1976, 47: 3 673-3 680.
- [8] Hull J R, Uherka K L. Manetic Heat Pumps for Near-Room-Temperature Applications[J]. *Energy*, 1989, 14: 177-185.
- [9] Pecharsky V K, Gschneidner Jr K A. Giant Magnetocaloric Effect in $\text{Gd}_5(\text{Si}_2\text{Ge}_2)$ [J]. *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 4 494-4 497.
- [10] Gschneidner Jr K A, Pecharsky V K, Zimm C B. New Materials for Magnetic Refrigeration Promise Cost Effective, Environmentally Sound Air Conditioners, Refrigerators/Freezers, and Gas Liquefiers[J]. *Mater Technol*, 1997, 12: 145-149.
- [11] Hu F X, Shen G B, Sun J R, et al. Influence of Negative Lattice Expansion and Metamagnetic Transition on Magnetic Entropy Change in the Compound $\text{LaFe}_{11.4}\text{Si}_{1.6}$ [J]. *Appl Phys Lett*, 2001, 78: 3 675-3 677.
- [12] Hu F X, Shen B G, Sun J R, et al. Very Large Magnetic Entropy Change Near Room Temperature in $\text{LaFe}_{11.2}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$ [J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 80: 826-828.
- [13] Hu F X, Shen B G, Sun J R, et al. *Phys Rev B*, 2001, 64: 012 409.
- [14] Wang F W, Wang G J, Hu F X, et al. Strong Interplay Between Structure and Magnetism in the Giant Magnetocaloric Intermetallic Compound $\text{LaFe}_{11.4}\text{Si}_{1.6}$: a Neutron Diffraction Study[J]. *J Phys Condense Matter*, 2003, 15: 5 269-5 278.
- [15] Wang Fangwei, Kurbakov A, Wang Guangjun, et al. Strong Interplay between Strucutre and Magnetism in $\text{LaFe}_{11.3}\text{Co}_{0.6}\text{Si}_{1.1}$: A Neutron Diffraction Study[J]. *Physica B*, 2006, 385-386: 343-346.
- [16] Liu D M, Yue M, Zhang J X, et al. Origin and Tuning of the Magnetocaloric Effect in the Magnetic Refrigerant $\text{Mn}_{1.1}\text{Fe}_{0.9}(\text{P}_{0.8}\text{Ge}_{0.2})$ [J]. *Phys Rev B*, 2009, 79: 014 435(1-7).
- [17] Tokura Y. *Colossal Magentoresistance Oxides*[M]. New York: Gordon and Breach, 2000.
- [18] Todura Y, Nagaosa N. Orbital Physics in Transition-Metal Oxides[J]. *Science*, 2000, 288: 462-468.
- [19] Rodríguez-Carvajal J, Hennion M, Moussa F, et al. Neutron-Diffraction Study of the Jahn-Teller Transition in Stoichiometric LaMnO_3 [J]. *Phys Rev B*, 1998, 57: R3 189-R3 192.
- [20] Bozin E S, Schmidt M, DeConinck A J, et al. Understanding the Insulating Phase in Colossal Magnetoresistance Manganites: Shortening of the Jahn-Teller Long-Bond across the Phase Diagram of $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ [J]. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 137 203(1-4).
- [21] de Teresa J M, Ibarra M R, Algarabel P A, et al. Evidence for Magnetic Polarons in the Magnetoresistive Perovskites[J]. *Nature*, 1997, 386: 256-259.
- [22] Viret M, Ott F, Renard J P, et al. Magnetic Filaments in Resistive Manganites[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 217 402(1-4).
- [23] Moussa F, Hennion M, Wang F, et al. Spin Waves and Phonons in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.09, 0.125$): Dynamical Signatures of Low-Temperature Phase Transitions for $x = 0.125$ [J]. *Phys Rev B*, 2003, 67: 214 430(1-11).
- [24] Hennion M, Moussa F, Lehouelleur P, et al. Confined Spin Waves Reveal an Assembly of Nanosize Domains in Ferromagnetic $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.17, 0.2$)[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 94, 057 006(1-4).
- [25] Wang F, Gukasov A, Moussa F, et al. Field-Induced Ferromagnetic Metallic State of Bilayer Manganite $(\text{La}_{0.4}\text{Pr}_{0.6})_{1.2}\text{Sr}_{1.8}\text{Mn}_2\text{O}_7$: A Polarized Neutron Diffraction Study[J]. *Phys Rev*

Lett, 2003, 91: 047 204(1-4).

- [26] Gukasov A, Wang Fangwei, Anighofer B, *et al.* Neutron Diffraction Studies under Pressure of the Field-Induced Ferromagnetic Metallic State in $(\text{La}_{0.4}\text{Pr}_{0.6})_{1.2}\text{Sr}_{1.8}\text{Mn}_2\text{O}_7$: Role of Super and Double Exchange[J]. *Phys Rev B*, 2005, 72: 092 402 (1-4).

- [27] Moussa F, Hennion M, Wang F, *et al.* Field-Induced Ferro-

magnetic Metallic State in the Bilayer Manganite $(\text{La}_{0.4}\text{Pr}_{0.6})_{1.2}\text{Sr}_{1.8}\text{Mn}_2\text{O}_7$, Probed by Neutron Scattering[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 107 202(1-4).

- [28] Moussa F, Hennion M, Gukasov A, *et al.* Intralayer and Interlayer Exchange Tuned by Magnetic Field in the Bilayer Manganite $(\text{La}_{0.4}\text{Pr}_{0.6})_{1.2}\text{Sr}_{1.8}\text{Mn}_2\text{O}_7$ Probed by Inelastic Neutron Scattering[J]. *Phys Rev B*, 2008, 78: 060 406(R) (1-4).



专栏特约编辑陈东风

陈东风：中国原子能科学研究院研究员，博士生导师，CARR 中子散射工程项目负责人，中国原子能科学研究院核物理所副所长，核工业研究生院和吉林大学客座教授，中国同步辐射学会常委，美国中子散射协会会员。1991 年毕业于吉林大学，分配到中国原子能科学研究院中子散射实验室工作；1997 年担任研究室副主任；1998 年至 2000 年在美国阿贡国家实验室从事博士后研究工作；2000 年至 2005 年担任研究室主任和中国先进研究堆中子散射项目负责人，负责中子散射工程 10 台谱仪的建设。在工程建设过程中，在国内外建立了广泛的合作关系，担任科技部 973 项目“中国先进研究堆中子束应用关键技术及若干科学问题”的首席科学家，针对工程未来应用的需要，开展了多项基



特约撰稿人刘蕴韬

础研究方面的工作。在国内外共发表文章和会议报告 130 余篇。

刘蕴韬：中国原子能科学研究院研究员，中子散射实验室主任，中子散射工程组副组长。1995 年毕业于吉林大学物理系，分配到中国原子能科学研究院中子散射实验室工作；2004 年获得德国柏林工业大学理学博士学位，期间于 2003 年获得国家百名海外优秀自费留学人员奖学金；2004 年回国，任中国原子能院中子散射工程组副组长兼工程技术总负责人；2005 年任中子散射实验室主任，中子散射工程组副组长；2007 年被聘为中国原子能科学研究院研究员。近年来，主要从事磁性材料、陶瓷材料储氢材料以及负热膨胀材料的材料结构与性能研究。目前承担的工程任务为参与和组织高分辨粉末谱仪、应力



特约撰稿人李峻宏

谱仪等设备的设计建造工作，科研上承担着 973、863 等重大项目。在国内外学术期刊以及国内、国际会议上发表文章和报告 50 余篇。

李峻宏：1975 生，理学博士，助理研究员。中国原子能科学研究院核物理研究所中子散射研究室中子衍射残余应力谱仪负责人。主要从事磁性材料、储氢材料以及纳米材料的结构与性能研究，熟悉并掌握中子衍射、X 射线衍射等测量与分析技术以及蒙特卡模拟中子散射谱仪方法。目前承担的工程任务为负责中子衍射残余应力谱仪的设计建造工作，科研上承担着国防预研、国防基础等项目。在国内外学术期刊以及会议上发表文章和报告 20 余篇。

杨金波：博士，教授，博士生导师。1988-1992 年于兰州大学物理系攻读学士学位。



特约撰稿人杨金波

1992-1995 年于兰州大学物理系攻读硕士学位，师从李发仲教授从事间隙型稀土铁金属间化合物和铁-镍氮化物磁粉的合成，磁性及超精细相互作用研究。1995-1998 年于北京大学物理系攻读博士学位，师从杨应昌院士从事新型稀土-过渡族金属间化合物的结构、磁性及超精细相互作用研究。1998-2000 年获德国洪堡奖学金，在德国德累斯顿固体材料研究所从事新型纳米永磁材料的结构与磁性研究。2000-2008 年于美国密苏里大学罗拉材料研究中心从事纳米磁性材料，高温磁体，固体燃料电池材料，储氢材料，磁电阻材料，超导材料及自旋电子材料的结构，磁性及电子输运特性研究。2008 年在北京大学物理学院从事磁性功能材料和能源相关材料的结构与性能研



特约撰稿人王芳卫

究。在国际主要学术杂志上发表论文 80 余篇，受邀撰写了《Handbook of Advanced Magnetic Materials》书中的章节。曾参加 863 计划，国家攀登计划，美国基金委和能源部项目。2005-2008 年参与主持美国能源部新型储氢材料的中子衍射研究项目。2000 年获全国优秀博士论文奖。2003 年获国家自然科学奖二等奖。

王芳卫：1967 年生，中科院物理研究所研究员，博士生导师。在国际学术刊物上发表和合作发表论文 130 余篇，他引 1000 余次。现任中国科学院物理所中国散裂中子源靶站谱仪中心副主任。主要研究方向包括：中子散射在凝聚态物质中的应用；稀土金属间化合物的结构与磁性；散裂中子源中子散射谱仪设计；强关联电子体系；分子磁性与有机磁体。