

磁性斯格明子: 前景与挑战

(南京大学 丁海峰、缪冰锋 编译自 Kirsten von Bergmann et al. *Physics World*, 2017, (5):25)

来自德国汉堡大学的 Kirsten von Bergmann 和 André Kubetzka 介绍了一种准粒子——磁性斯格明子的特性，并展望了磁性斯格明子作为一种全新的信息载体在未来信息存储领域的发展前景。

学术界以科学家名字来命名某种粒子以致敬科学家的伟大贡献。获此殊荣的通常都是享有盛誉的大科学家，例如 Enrico Fermi, Satyendra Nath Bose 和 Peter Higgs 等。相对而言，Tony Skyrme 这位英国物理学家却少有人知。Skyrme 在 20 世纪 60 年代初发展了一套描述原子核力的理论模型，通过求解非线性场论方程得到一种具有粒子性质的拓扑孤子。直到他去世前五年（注：Tony Skyrme 于 1987 年去世），这一粒子才被科学界关注并被命名为斯格明子(skyrmion)。

近来，斯格明子的一种表现形式，磁性斯格明子成为了物理学领域的一个重要研究热点。由于具有拓扑特性，磁性斯格明子展现出很

多有趣的物理行为；尤为重要的是它结构十分稳定，还可以作为未来存储器件中的信息载体。在磁性斯格明子中，相邻磁矩的取向之间存在着小的夹角，使得每个斯格明子中心区域的磁矩与外部的磁矩成反平行排列。磁性斯格明子是一种准粒子，在电流等外力的驱动下能够像真实粒子一样运动，由于彼此间相互作用，可以形成晶格，也存在对应的反粒子——反斯格明子。类似于一对电子和反电子的湮灭行为，一对斯格明子和反斯格明子可以塌缩为平庸的铁磁态。

斯格明子的稳定性

在现实材料中，仅仅依靠拓扑特性还无法阻止斯格明子或反斯格

明子塌缩到平庸的铁磁态。它的稳定性还来源于自旋轨道耦合引起的 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用(DM 相互作用)。通常，磁性相互作用(海森伯交换作用)正比于相邻自旋的点积，使得相邻磁矩成平行或反平行排列。而 DM 相互作用是一种非共线的相互作用，它正比于相邻自旋的叉积，倾向于使相邻磁矩成相互垂直排列。海森伯交换作用与 DM 相互作用的竞争使得相邻磁矩的取向之间具有一个小的夹角时最为稳定。DM 相互作用的存在使得斯格明子能够在铁磁材料背景中降低能量，从而保持斯格明子的稳定。DM 相互作用通常需要在中心反演对称性发生破缺的体系中才能产生，因此斯格明子大多存在于手性材料中，或者是表面/界面导致的界面反演对称性破缺的磁性薄膜当中。

斯格明子的应用前景

当前人们对于斯格明子的研究兴趣主要源于其在信息技术领域的重要应用前景。由于其特殊的磁构型，斯格明子与电流之间的相互作用很强。电子在斯格明子中传播时，能够将自旋角动量传递给局域磁矩并产生力矩，驱动斯格明子运动。在铁磁/非磁双层膜材料中，垂直方向的纯自旋流也可以驱动斯格

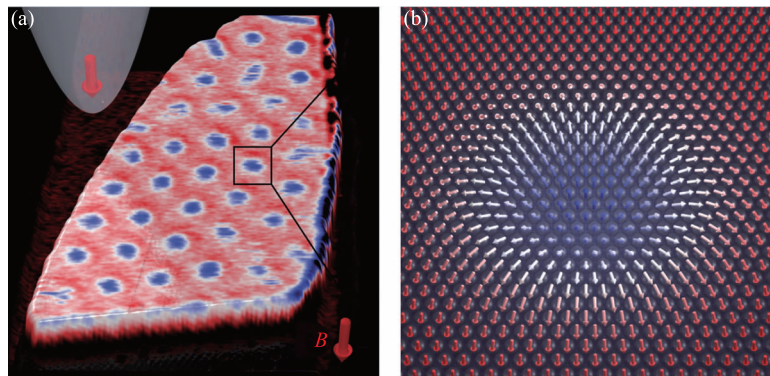


图1 (a)在Ir单晶衬底上的Pd/Fe双原子层体系中利用自旋极化扫描隧道显微镜观察到的磁性斯格明子，蓝色代表磁矩方向向上，红色代表磁矩方向向下，白色代表磁矩沿水平方向排列(外加磁场为1.1 T，温度为8 K)；(b)斯格明子内部磁矩分布的示意图

明子运动,运动方向与斯格明子内部磁矩的分布有关。

目前实验上观测到的斯格明子,尺寸跨度很大,从微米到纳米,甚至小到仅包含数十个磁性原子。利用自旋极化扫描隧道显微镜,研究人员在铱(Ir)单晶衬底上外延的铁(Fe)/钯(Pd)双原子层体系中观察到了尺寸很小的斯格明子(图1(a))。基于隧道磁电阻原理,带有磁性的针尖与样品间的隧穿电流与样品表面的磁矩方向有关,通过检测隧穿电流即可测出样品的磁矩方向。检测出的磁性斯格明子如图1(a)所示,与针尖磁矩取向平行磁化的区域用红色表示,反平行磁化的区域用蓝色表示。斯格明子的直径(完全处于平面内磁矩组成的圆)约为3.5 nm,相当于13个原子大小。图1(b)展示的是斯格明子在原子尺度的磁结构示意图。

目前市场上最主流的信息存储方式是磁硬盘。磁硬盘使用磁性存储介质,理论上可以进行无限次的读写。但硬盘包含旋转的磁盘和磁头等机械运动部件,防震抗摔性差,磁头和磁介质容易受到损坏。2008年,美国IBM公司Stuart Parkin博士和合作者提出使用磁畴壁作为信息存储载体的赛道存储器。2013年,诺贝尔物理学奖获得者Albert Fert教授将这一想法拓展到磁性斯格明子体系,以斯格明子存在与否来对应信息记录的“1”和“0”。

在赛道存储器中,电流驱动磁畴壁或者磁性斯格明子发生移动,记录的比特信息沿着赛道运动,但是赛道本身(包括读写单元)是静止的。由于没有机械运动部件,赛道存储器具有极高的防震抗摔性,能

够满足移动设备的应用需求。同时,和硬盘中二维的磁盘不同,赛道存储器可以是三维的存储器件。因此,磁性斯格明子赛道存储器能够极大地提高磁存储的密度和稳定性,有望成为新一代的信息存储器。

然而,在磁性斯格明子赛道存储器真正走向日常应用之前,还有很多困难需要克服。目前,在手性材料中虽然已观测到斯格明子晶体在电流的驱动下的平滑运动,但还缺乏对单个斯格明子的有效操控,而这对于磁记录而言是极为重要的。在磁性薄膜中,分立的斯格明子已经在实验上被观察到,但材料缺陷、晶界对斯格明子钉扎依然是个不利因素。同时,目前报道的室温下稳定存在的磁性斯格明子尺寸通常较大,不利于高密度存储的应用。

斯格明子走向器件化

为了提高密度,信息存储需要存储单元——斯格明子尺寸越小越好。但随着尺寸变小,信息读写的难度会陡然增加。最新的研究成果表明,这一困难可以被突破。如上所述,利用自旋极化扫描隧道显微镜的自旋分辨功能已能将大小仅为几纳米的斯格明子读出;而进一步的研究发现,利用针尖与样品之间的电场可以实现磁性斯格明子的写入。这样,在同一器件中已能同时

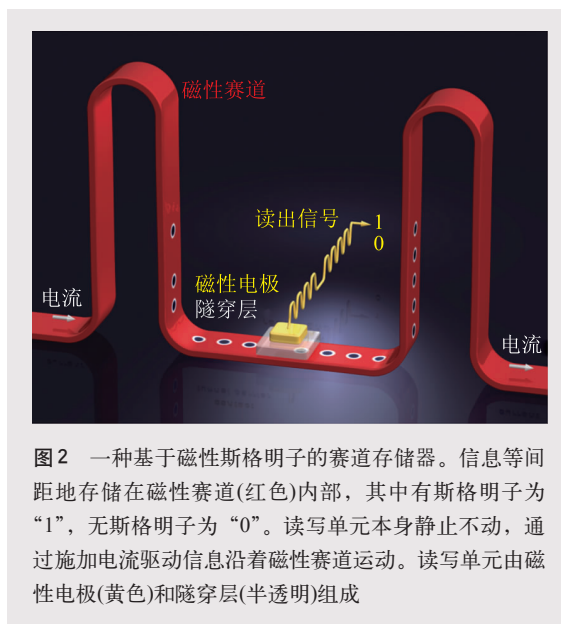


图2 一种基于磁性斯格明子的赛道存储器。信息等间距地存储在磁性赛道(红色)内部,其中有斯格明子为“1”,无斯格明子为“0”。读写单元本身静止不动,通过施加电流驱动信息沿着磁性赛道运动。读写单元由磁性电极(黄色)和隧穿层(半透明)组成

实现纳米尺寸斯格明子的读写功能。并且这种实验构型还可以和目前应用广泛的磁隧道结技术相兼容。如图2所示,在斯格明子赛道存储器中采用磁性电极/隧穿层/磁性赛道材料结构就可以实现电场写入和探测磁性斯格明子。

目前,斯格明子赛道存储器应用所涉及的所有关键操作,包括斯格明子的电流驱动、写入和读出,都已经被实验所证实。但是这些实验是在不同的材料体系、不同尺度、甚至是在不同磁场和不同温度环境下实现的。若想要将斯格明子赛道存储器走向器件化,剩余的挑战就主要在于在同一个原型器件中实现上述关键操作。

简而言之,磁性斯格明子赛道存储器有望实现高密度、高速度、低能耗、无机械运动的信息存储,具有重要的应用价值,并已展现出一定的可行性。但要真正地实现它,仍需要迎接一些挑战。