

# 多拓扑荷“磁束子”的发现\*

汤进 田明亮 杜海峰†

(中国科学院强磁场科学中心 极端条件凝聚态物理安徽省重点实验室 合肥 230031)

2021-08-30收到

† email: duhf@hmf.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20211107

当今信息爆炸的时代得益于信息存储技术的快速发展。磁存储是当今的主流信息存储技术之一，存储了全球大约70%的数据。在以机械硬盘为代表的磁存储器中，自旋向上和向下的反平行排列的磁状态被用来代表二进制数据比特“0”和“1”。机械硬盘的盘面就分布了高密度的不同取向的磁畴，通过悬浮在盘面上读头的高速机械转动来实现数据的读写<sup>[1]</sup>。现如今，我们花几百块钱就可以买到一个2.5英寸大小的2 Tb容量的机械硬盘，即该硬盘中可以存储2万亿个数据比特(磁畴状态)。然而，受限于硬盘中采用机械运动来实现数据寻址的方式，硬盘存储器的速度较慢，这无疑制约了其进一步发展。如今，探索新型磁材料及结构，构筑高速度存储器已经成为各国材料信息领域的研究重点。

2009年，德国科学家在非中心对称晶体MnSi

材料中发现了一种涡旋状手性磁结构“磁斯格明子(Skyrmion)”<sup>[2]</sup>。和传统的铁磁或者反铁磁自旋排列不同，斯格明子的自旋排列具有某种不变性，即磁斯格明子的自旋分布能够完整投射到整个球面上，并且这种特性不受磁斯格明子连续形变的影响，因此磁斯格明子也被称为拓扑磁结构，如图1(a)所示。其不变量可用磁拓扑荷( $Q$ )来描述， $Q$ 表征一个磁矩分布状态映射到一个序参量空间(通常为一个布洛赫球)时，其环绕序参量空间的次数。按照上述定义，斯格明子的拓扑数为单位整数 $Q = \pm 1$ <sup>[3]</sup>。磁拓扑荷作为磁斯格明子的重要内禀性质，不仅令其呈现出不同于传统磁畴的类粒子行为，如磁斯格明子的晶格态、液态、布朗运动和在外场调控下的有序运动<sup>[2, 4-6]</sup>，还由于涡旋状斯格明子的层展电磁场增强与自旋电流的耦合，具有高效率的电流可调控性<sup>[7]</sup>。自磁斯格明子发现以来，也陆续有磁浮子<sup>[8]</sup>、类斯格明子<sup>[9]</sup>、磁泡斯格明子<sup>[10]</sup>、磁麦韧等加入到了拓扑磁结构家族中<sup>[11]</sup>，它们与斯格明子类似，具有强自旋-电子耦合特性，不仅能够作为数据信息载体构建高速新型赛道磁存储器，还可以构建用于逻辑运算和神经网络等的自旋电子学器件<sup>[12]</sup>。以拓扑磁结构为对象的科学研究成为了当前自旋电子学的一个重要研究分支——拓扑自旋电子学<sup>[12, 13]</sup>。

拓扑自旋电子学的核心科学问题是拓扑磁结构的发现和操控。在现有的拓扑磁结构家族中，它们的自旋分布大多数只能够覆盖球面一次，即拓扑荷最多为整数1。一个自然的疑问是，拓扑荷作为描述磁结构的一个重要参数，是否可以任意整数？为此，科学家们在理论上提出了两种可能实现的多拓扑态磁结构的物理模型：(1)多个斯格明子的集合被一个具有拓扑荷反号的斯格明

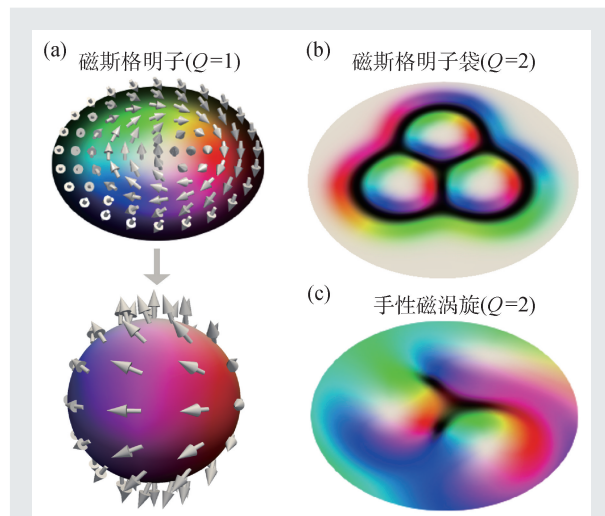


图1 (a)斯格明子的拓扑性<sup>[3]</sup>：磁斯格明子自旋能够完整映射到整个球面，即拓扑荷为1；两种理论提出的多拓扑态磁结构：磁斯格明子袋(b)和手性磁涡旋(c)

\* 国家自然科学基金(批准号：51622105、12174396、11804343)资助项目

子包裹成聚合磁结构,即“磁斯格明子袋(Skyrmion bag)”<sup>[14, 15]</sup>,其拓扑荷等于内部斯格明子数目减去1,如图1(b)所示;(2)斯格明子畴壁自旋发生 $360^\circ$ 的整数倍的多次连续反转的磁结构,即高阶磁斯格明子(high-order skyrmion)或多拓扑手性磁涡旋(chiral vortex),其拓扑荷等于畴壁自旋扭转的周期数,如图1(c)所示<sup>[16]</sup>。这些多拓扑态磁结构能够大大丰富和拓宽传统拓扑磁结构的研究,也能够用来构建独特的拓扑自旋电子学器件,但关于它们的研究尚且停留在理论模拟层面。在磁性模拟研究中,可以通过弛豫初始化特殊的袋状磁构型等来得到多拓扑磁结构。但在实际实验中,这种模拟研究中纳米尺度下灵活地操控自旋的集体行为难以实现。因此,实验上如何可控实现这些多拓扑态磁结构仍然充满挑战。

利用洛伦兹透射电子显微镜原位磁结构观测及调控技术,我们开展了多拓扑态磁结构的实验研究<sup>[17]</sup>。如前文提到的,两种多拓扑态物理模型是二维的,然而在真实材料中,材料存在一定厚

度,需要考虑磁状态的三维特性。因此,利用三维微磁学计算方法,我们通过弛豫一个初始的三维斯格明子袋,得到了一种稳定的三维磁多拓扑态,如图2(a)所示。它中间层的磁状态保持了初始的斯格明子袋,但其沿着厚度方向上存在自旋扭转,表面层的磁状态为高阶磁斯格明子(多拓扑态磁涡旋)。考虑其构型类似于超导涡旋束,这种三维多拓扑态被我们命名为“磁斯格明子束”(Skyrmion bundles),简称“磁束子”。由于磁束子的三维特性,磁束子的电镜观测磁信号,即面内平均磁化分布,呈现为强衬度的内部斯格明子(正拓扑荷)和弱衬度的外部环绕螺磁畴(负拓扑荷)的结合,如图2(b)所示。

然而,由于稳定内部斯格明子和外部螺磁畴所需的磁场条件完全相反,磁束子无法像斯格明子一样通过在螺磁态下施加外磁场就能够实现。为了实现磁束子,我们提出了一个两步走的策略:首先通过施加磁场实现内部斯格明子管,再退到零磁场,得到零磁场磁斯格明子和螺磁共存态,该零磁场共存态可以通过场冷的方式得到;之后,在零磁场磁斯格明子和螺磁共存态的基础上反向施加磁场,在一定磁场下,斯格明子仍能稳定存在并且螺磁态收缩并完全包裹住斯格明子,从而最终形成磁束子。通过这种两步走策略,我们在实验上成功实现了多拓扑态磁束子。

磁束子应用到未来的拓扑磁电子学,还需要实现电学操控磁束子的运动。为此,我们还开展了纳秒电流脉冲驱动下磁束子的运动研究。实验发现,磁束子作为一个整体,能够被较小的电流脉冲连续有效地驱动运动,它们的运动轨迹和方向可以通过电流方向来调控。依据Thiele粒子运动方程,除了在电流方向的运动以外,由于拓扑磁结构作为类粒子运动过程中的马格纳斯(Magnus)力,还会发生垂直于电流方向的偏转。因为类似于电子的霍尔效应,这种效应也被称为斯格明子霍尔效应<sup>[6]</sup>。在实验中,我们也证实了磁束子的霍尔效应,它们在电流驱动下的霍尔偏转方向与拓扑荷符号有关,如图2(c)所示。

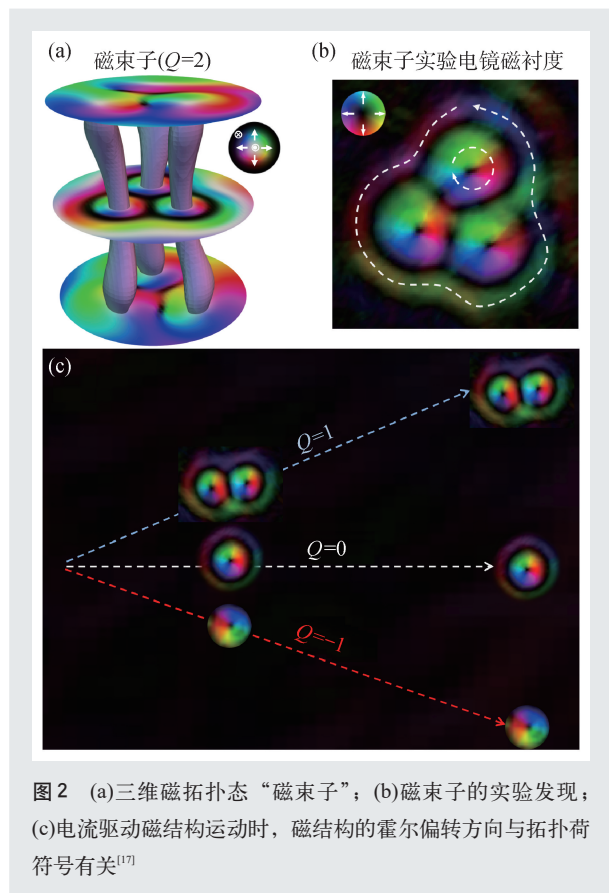


图2 (a)三维磁拓扑态“磁束子”;(b)磁束子的实验发现;(c)电流驱动磁结构运动时,磁结构的霍尔偏转方向与拓扑荷符号有关<sup>[17]</sup>

我们在实验上发现了多拓扑态磁束子并实现了它们在电流驱动下的类粒子运动。磁束子的发现丰富了拓扑磁结构家族,将拓扑磁电子学研究对象从单位拓扑荷拓展到了多拓扑荷磁结构。磁束子作为新的数据载体为未来多态磁存储、神经网络、信息互联、逻辑及信息处理器件等的开发提供了独特和多样的思路,有望开辟拓扑自旋电子学研究新领域。譬如, Foster 等指出多拓扑荷

磁结构可以用来对英文字母等作 ASCII 二进制编码<sup>[14]</sup>;多拓扑荷磁结构在赛道中不同的运动分叉路径(图 2(c))也可以被用来实现单个赛道中多信号混合传输,即信息互联运算器件<sup>[18]</sup>;具有不同拓扑荷的磁束子会呈现出不同的拓扑霍尔效应等磁电输运行为,因此也可以作为权重应用在神经网络器件中<sup>[19]</sup>。这项研究成果近期发表在期刊 *Nature Nanotechnology* 上<sup>[17]</sup>。

### 参考文献

- [1] Gourevitch P *et al.* World Development, 2000, 28: 301  
 [2] Mühlbauer S *et al.* Science, 2009, 323: 915  
 [3] Jin C *et al.* Nat. Commun., 2017, 8: 15569  
 [4] Huang P *et al.* Nat. Nanotechnol., 2020, 15: 761  
 [5] Zhao L *et al.* Phys. Rev. Lett., 2020, 125: 027206  
 [6] Jiang W *et al.* Nat. Phys., 2017, 13: 162  
 [7] Jonietz F *et al.* Science, 2010, 330: 1648  
 [8] Zheng F *et al.* Nat. Nanotechnol., 2018, 13: 451  
 [9] Jiang J *et al.* Acta Mater., 2021, 215: 117084  
 [10] Tang J *et al.* Natl. Sci. Rev., 2021, 8: nwaa200  
 [11] Yu X Z *et al.* Nature, 2018, 564: 95  
 [12] Zhang X *et al.* J. Phys.: Condens. Matter, 2020, 32: 143001  
 [13] Kang W *et al.* Proc. IEEE, 2016, 104: 2040  
 [14] Rybakov F N, Kiselev N S. Phys. Rev. B, 2019, 99: 064437  
 [15] Foster D *et al.* Nat. Phys., 2019, 15: 655  
 [16] Karnieli A *et al.* Nat. Commun., 2021, 12: 1092  
 [17] Tang J *et al.* Nat. Nanotechnol., 2021, 16: 1086  
 [18] Chen R *et al.* Phys. Rev. Res., 2020, 2: 043312  
 [19] Zhang Y *et al.* Sci. China-Phys. Mech. Astron., 2020, 63: 277531



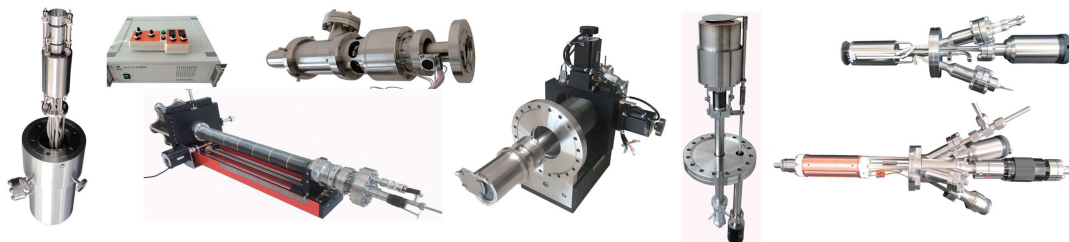
## 大连齐维科技发展有限公司

地址: 大连高新园区龙头工业园龙天路27号

电话: 0411-8628-6788 传真: 0411-8628-5677

E-mail: [info@chi-vac.com](mailto:info@chi-vac.com) HP: <http://www.chi-vac.com>

表面处理和薄膜生长产品: 氩离子枪、RHEED、磁控溅射靶、束源炉、电子轰击蒸发源、样品台。



超高真空腔室和薄膜生长设备: PLD系统、磁控溅射系统、分子束外延系统、热蒸发镀膜装置。

