

## 设计阻挫

(南京大学 谢云龙、刘俊明 编译自 Ian Gilbert. *Physics Today*, 2016, (7):54)

所谓几何阻挫,是指缘起材料晶格几何结构的一类现象。阻挫系统中,如果近邻作用无法同时满足能量极小,就会出现几何阻挫。最简单的自旋阻挫系统由三个位于正三角形顶点且两两之间反铁磁耦合的伊辛(Ising)自旋组成,无论何种自旋构型都无法使所有近邻自旋满足反铁磁排列。相对于此,复杂情况下的自旋阻挫往往是系统晶格结构以及特定自旋相互作用叠加的结果。在阻挫之茫茫世界中,自旋相互作用之间的竞争会导致许多新奇物理现象。就像自旋液体,即便温度极低,自旋涨落却依然很强,使之无法弛豫到基态,皆因此。

近年来几何阻挫的研究以“自旋冰”材料最为夺目。所谓自旋冰,其晶格由正四面体共点链接,形成烧绿石结构。每个四面体顶点都被局域磁矩很强的磁性稀土离子占据,而晶体场的影响迫使稀土离子磁矩表以伊辛自旋形式,自旋方向由平行于相邻两个四面体体心连线指向四面体体心或体外两个方向。由此,自旋冰中的阻挫就表现为每个四面体单元内局域能量最低的自旋排列方式是:两个自旋指向体心,两个自旋指向体外,即所谓“两进两出”自旋构型,类比于冰中氢氧之间的空间距离。也因此,这种自旋排列规则被称为“冰规则”,想象颇为丰富浪漫。由于每个四面体满足“冰规则”的自旋排列共有6种,所以自旋冰在低温下存在大量简并态,在实验上表现为自旋冰系统在极低温下依然保有很大剩余

磁熵,令人印象深刻。

当前对自旋冰的研究高度关注其中的元激发现象与物理,个中缘由皆因自旋冰中激发出的准粒子可以看作磁单极子,意图挑战磁单极子不存在的观念。只是,这里所说的磁单极子跟狄拉克梦里的磁单极子有所不同。如果自旋冰的“两进两出”构型被破坏,就会出现“三进一出”或者“三出一进”的构型,看起来这个四面体体心“产生”了一个净余的磁荷。与狄拉克磁单极不同,这里的磁单极子一定是成对出现,一正一负,正负磁单极子均可以独立地在晶格中运动,两两被所谓的“狄拉克弦”(Dirac string)所联系。

不仅如此,过去十年间,科学家借助微加工技术和显微观测技术开启了一条研究自旋冰的新途径——人工自旋冰。

相对于天然自旋冰实验研究所面临的巨大挑战:极低的温度以及极高精度的测量技术,人工自旋冰的实现与探索就变得容易很多。通过把自旋结构和相互作用关系映射到二维面内,用单畴磁岛的宏观磁矩来代替微观自旋,可以构建出人工自旋冰模型。这种模型体系一般在微米甚至更大尺度,便于实空间直

接观测,磁矩大小在百万玻尔磁子的量级,属于宏观“自旋”。这一途径非常典型地体现了凝聚态物理中的层展思路,活灵活现地抽取出自旋冰物理的核心,展现了所谓“设计阻挫”,令人激赏。

### 人工自旋冰的构建 ——磁岛和格点构型

当前受关注的人工自旋冰模型有两类:四方自旋冰模型和Kagome自旋冰模型,如图1所示。其中,每一磁岛都被设计成长条形,以利用磁岛中磁矩内禀的单轴各向异性,实现伊辛磁矩沿着长边方向。

2006年,王瑞方等人首次制备出四方人工自旋冰结构,并开展了细致研究。这里的磁岛采用各向同性铁镍合金制成,每个磁岛宏观磁

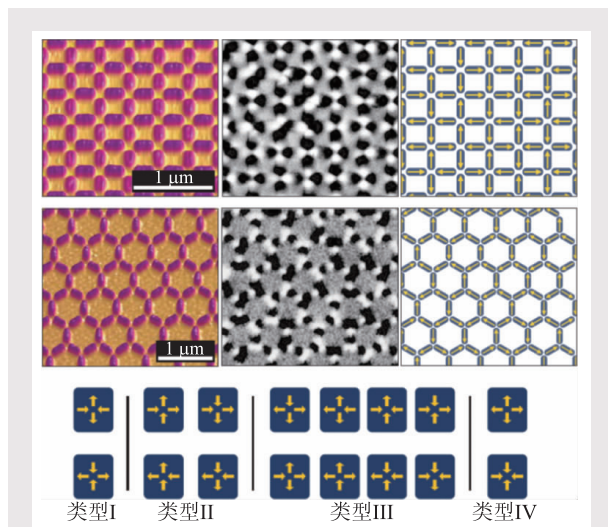


图1 两种常见的二维人工自旋冰模型:四方格点模型(上)和Kagome格点模型(中)。从左向右依次为原子力显微镜图像、磁力显微镜图像和相对应的自旋构型图。最下方为四方自旋冰格点构型分类,共计16种自旋构型,按照对称性可分为四类,从左向右能量依次升高

矩约为  $10^7 \mu_B$ ，在室温下非常稳定，因为翻转单个磁矩需要相当于  $10^6$  K 的能量。四方自旋冰中相邻 4 个“自旋”共享一个格点，以格点为基本单位的低能构型有两类：第 I 类和第 II 类，其共同点是两个“自旋”指向格点，两个“自旋”背向格点，满足所谓的“冰规则”。既然室温热涨落不足以促进系统演化，就需要一种模拟涨落的环境，诸如外加旋转的交变磁场来激励。旋转的交变磁场初始系统经历各种不同格点构型，从热力学意义上，能量越低的构型保留下来的概率越高。而实验也的确观测到这一现象：第 I 类和第 II 类格点构型比例更高，说明“冰规则”在人工自旋冰中依然适用。然而，第 I 类和第 II 类格点虽然都满足冰规则，但没有净余磁荷，其能量并不相等。由于相互垂直的近邻作用强于相互平行的近邻作用，第 I 类格点比第 II 类格点的能量更低，所以四方自旋冰的基态是由第 I 类格点构成的长程有序态。

与四方人工自旋冰不同，Kagome 人工自旋冰中近邻磁岛之间的相互作用都是相同的，其几何的高对称性使得该模型阻挫度更高，热力学相更复杂。John Cumings 等人最早关注这一模型，他们发现 Kagome 人工格点的磁矩排列满足“准冰规则”：即三个磁矩之一指向格点、两个背向格点；或者

两个指向格点，一个背向格点。由于每个格点周围的自旋数目为奇数，任一格点的进出自旋不能相互抵消，因此 Kagome 人工自旋冰中每个格点均保留净余磁荷，体系表现出更强的磁荷关联作用。

### 人工自旋冰的热平衡过程

如前所述，人工自旋冰之磁矩翻转需要很大能量，虽然实验上可通过交变外磁场模拟系统涨落过程，筛选出低能构型，但这一过程毕竟不同于实际热涨落，所以实验上很难得到完全由第 I 类格点组成的基态构型。

2011 年，Chris Marrows 等人针对四方人工自旋冰模型，观测到明显的畴结构，每个畴由第 I 类格点构成。在有序基态背景下还存在激发行为，且这些激发态分布满足玻尔兹曼分布律。这一结果似乎表明他们得到了一个真正热力学平衡态下的人工自旋冰行为。他们构建热力学平衡态的方法是这样的：初始磁岛只有几纳米厚，磁畴很容易翻转，热力学演化使得系统倾向于能量更低的第 I 型格点。随着磁岛渐渐变厚，翻转磁畴需要能量不断增大，直到磁畴无法翻转，系统构型被锁定。由此，诞生了一个完美的热力学平衡态人工自旋系统。受此启发，其他小组也纷纷跟进，其中之一是将样品温度升到磁岛居里温度之上，消除磁岛的铁磁序；

随后缓慢冷却到居里温度之下，磁岛磁矩之相互作用使磁矩重新排列，所得之构型也接近热力学平衡态。

另外，控制磁岛厚度以及选取合

适材料，可以无需借助外场而自发演化到热力学近平衡态。图 2 所示就是乌普萨拉大学 Björgvin Hjörvarsson 等人在室温下所看到的四方人工自旋冰系统之动力学演化进程。

### 人工阻挫的其他相关问题

对人工阻挫物理的理解正在不断深化，目前的研究已不限于热力学与统计物理，也不满足于追逐新的微观构型。人工阻挫物理的研究范畴正在不断拓展。首先，人工阻挫系统的基本单元可由多种不同材料制成，如利用非磁性的弹性小球在二维平面内密集堆积排列，形成三角晶格。因为弹性小球之间存在弹性排斥力，为降低弹性能，部分小球将被排挤到面外，产生阻挫构型。这一构型表现为任意相邻三个小球不会同时在面内或者面外，与三角自旋阻挫很类似。其次，在六角阵列的约瑟夫森结和超导环中也能够观测到类似阻挫现象。再次，阻挫系统中电荷输运、畴壁动力学、电子关联等等物理问题的研究正方兴未艾，日益精进。

在几何构型上，除三角格点、四方格点、Kagome 格点这些传统几何阻挫晶格之外，二维准晶结构中也能观测到阻挫现象。另外，可以将人工自旋冰结构有意识地沉积在一些新颖的材料基底上，包括生长在二维电子气系统、超导材料、拓扑绝缘体等基底上。人工自旋冰特殊的阻挫构型可以对基底施加复杂磁场，诱发基底出现新的物理现象。事实上，越来越多新奇有趣的物理结果正源源不断地被呈现出来，使得我们有理由相信，人工阻挫物理与材料的研究一定会愈加丰富多彩，正所谓“天然阻挫隐春秋，不胜人工巧落珠”。

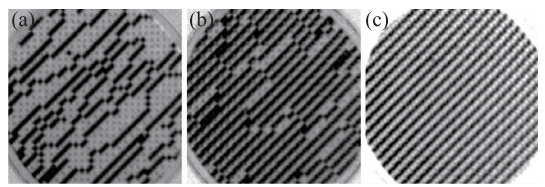


图 2 四方人工自旋冰的光发射电子显微镜图像 (a) 初始态，长程无序；(b) 由(a)演化而来的中间态；(c) 系统演化到最终的状态，即长程有序态