

自旋的故事:从自旋起源到自旋手性*

梁中宇¹ 罗昭初¹ 于涛^{2,†}

(1 北京大学物理学院 北京 100871)

(2 华中科技大学物理学院 武汉 430074)

2023-11-01收到

† email: taoyuphy@hust.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20231207

1 引言

我们小时候都玩过陀螺，它是一种非常有趣的玩具。当用力抽动陀螺，它就会在地面上快速旋转，像一个小小的旋风。但是随着时间的流逝，陀螺旋转的速度会慢慢降低，它会开始摇摆不定，最终停止旋转。我们知道，抽动的力越大，陀螺就会旋转越快，转得更久。让我们思考一个极限的问题，假定陀螺和地面没有任何摩擦，多大的力能够使陀螺开始旋转呢？也就是说，是否存在转动的最小单位？在经典的世界，这个力应该是无穷小的。但是在量子的世界里，却不一样。从物理学的角度看，陀螺是有质量、有尺寸的旋转物体，它的旋转带有一定的“角动量”。这种“角动量”可以保持不变，除非有外力对它施加扭矩。

现在让我们想象一下，如果陀螺带有电荷，它的旋转会产生什么效果呢？我们知道，电荷做圆周运动会形成电流环。根据电流的磁效应，电流环会在周边产生磁场。所以一个带电的旋转陀螺就像一个“小磁铁”，它不仅可以和周围的磁场相互作用，也可以和其他的“小磁铁”相互作用。在物理学上，可以认为这样一个小的磁铁拥有一个固定的“磁矩”。在带电陀螺这个例子中，这个磁矩的方向就由电荷环

流的方向决定：当我们竖起右手的拇指时，拇指方向就是这个磁矩的方向，而其他四个手指的指向就是电荷环流的方向。今天我们所介绍的主角——电子自旋，它和我們所熟知的陀螺的特性有一定的联系。

电子的自旋是一个重要的物理概念，它是电子固有的“量子”属性。它类似于陀螺的旋转，但又不完全相同。它和电子的电荷属性一起被认为是电子的两种基本属性。尽管大家较早就发现了电子(1897年汤姆孙在阴极射线中发现电子)，也发现了电子的电荷属性，但是人们对电子自旋的了解却不到一百年。然而，在这短短的90多年时间内，它已经给信息技术和每个人的生活都带来了翻天覆地的影响，我们的手机、笔记本电脑中每时每刻都有亿万万个自旋在翻转和流动。那么，电子自旋是如何被发现的？电子自旋是怎么被应用到信息技术上的？电子自旋对我们的现实生活有什么意义和影响？新中国成立后我国是如何开始系统地开展自旋应用相关研究的？电子自旋还有哪些未知的秘密等待我们去探索？本文将一一介绍。

2 电子自旋的实验发现

早在20世纪20年代，物理学家们已经非常清楚地了解到：原子是由正、负电荷组成，而且正、负电荷都有一个载体，分别是质子和电子。美国物理学家密里根的油滴实

验告诉我们，电子电荷只能是某个数值的整数倍。英国物理学家卢瑟福等也揭示了原子中有一个小小的带电核心，叫做原子核，而电子则围绕着原子核不停地做圆周运动。随着量子力学的建立，物理学家们还弄清了电子运动的奇怪规律：它们遵循着“波粒二象性”，即电子既可以表现为粒子，也可以表现为波，原子内的电子就像一团云雾一样概率性地分布在原子核周围的空间中。

量子力学的理论近乎完美，几乎所有的光谱实验都能被很好地理解。但是，还有一些“小问题”没有被弄明白。比如说，在光谱实验中看到磁场下氢原子的光谱中总有一些细微变化。氢原子只有一个电子，按照量子跃迁理论它的光谱应该很简单。但实际上，在氢原子光谱中，有一些谱线分裂成两条位置非常接近的谱线(即两条能量差很小的谱线)，这就是能级的精细结构。物理学家们曾试图用相对论效应来解释精细结构，但是这个理论给出的结果并不符合实验的观测。

1921年，美国物理学家康普顿通过X射线研究材料磁化效应时发现电子绕原子核的轨道运动对磁化效应不起作用，因此他认为铁磁性是由于电子本身的固有特性导致的。于是，康普顿进一步提出了一个大胆的假设：在原子中，电子也许不仅具有轨道角动量，自身也携带角动量，或者叫做“自旋”。这实

* 国家自然科学基金(批准号: 12374109, 52271160)资助项目

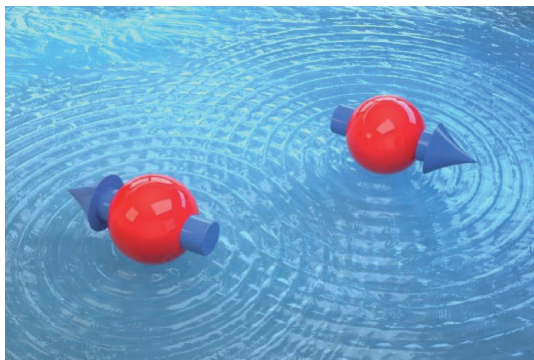


图1 康普顿的设想：“自旋”及其产生的磁场

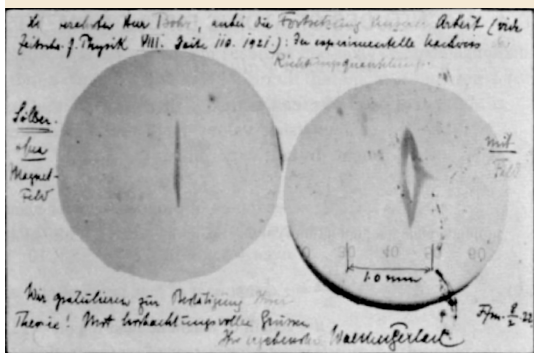


图2 施特恩—格拉赫实验的结果(图片来源于网络)

属石破天惊的一笔，康普顿的思想应该受到科学史的铭记。他认为电子可以看作一个带电荷的小球，很像一个陀螺，绕着轴心旋转，并能够产生一个磁场。打个比方，这就好像图1所示水面上的两个旋转的小球，小球的旋转会引起荡漾的水波，两个小球之间可以通过水波作为媒介相互作用。这样一来，电子就有两种可能的旋转状态：顺时针或逆时针旋转。康普顿大胆推测，如果把一个具有自旋的带电粒子放在一个外部磁场中，它的能量会发生变化，因为自旋会受到外部磁场的作用，而这将导致原子光谱线发生分裂从而产生精细结构。利用这个假设，康普顿还解释了一些铁磁物质的性质，但是他没有给出电子自旋的具体数值，也没有提供实验证据。

1922年，德国物理学家施特恩和格拉赫为了检验电子具有“自

旋”磁矩的理论设想，设计了一个精妙的实验。他们把一束银原子蒸气通过一个与之垂直且具有非均匀强度的磁场，然后观察银原子在屏幕上的分布。如果银原子没有自旋磁矩，那么它们的运动应该不受磁场的影响，从而在屏幕上形成一个模糊的斑点。如果有自旋磁矩，并且自旋磁矩可以在一定范围内取任意值，那么应该在屏幕上形成一条沿着磁场强度变化方向的线段。但是，实验结果出乎意料：如图2所示，银原子在屏幕上形成了两条清晰的暗痕，两条暗痕的方向与磁场强度

变化的方向一致。从现在的视角看，这两条暗痕分别对应于两种不同的自旋方向。有趣的是，当时他们将观测的结果错误地归结为轨道磁矩，还于1922年2月8日通过明信片的方式寄给了玻尔。那时自旋的概念还没有出现，正确的解释是Ag原子的外层只有一个自旋为 $1/2$ 的电子，两条清晰的暗痕来自于电子的自旋属性。这一小插曲并不妨碍后续学者阐明电子自旋的存在，并得出电子自旋是量子化的结论：电子自旋要么是顺时针，要么是逆时针，它只能取两个离散的值。后来，奥地利物理学家泡利在1925年1月首次提出，任何两个电子不能占据同一个态，不能用同一组量子数来表示，这就是著名的泡利不相容原理。

过了几年，即1925年，荷兰—美国物理学家古德斯密特和乌伦贝

克在知道了施特恩—格拉赫实验的结果后，提出了一个关于电子自旋量子化的设想。由于理论以及实验验证发现基本粒子可视为半径为零的点粒子，因此带电物体自转产生磁矩无法直接套用到自旋角动量上来。所以他们认为电子自旋不是由电子真正的空间自转造成的，而是一种内禀的量子属性。他们还引入了第四个量子数：自旋量子数，来表征电子自旋的状态。自旋量子数只能取 $+1/2$ 或 $-1/2$ 这两个值之一，分别对应于向上或向下(顺时针或逆时针)的自旋方向。他们用这个理论成功解释了氢原子光谱中的精细结构以及施特恩—格拉赫实验。

3 电子自旋的微观理论解释

随后，电子自旋的神秘面纱被狄拉克揭开。1928年，狄拉克建立了电子的相对论性量子方程(狄拉克方程)，从理论上推导出电子具有自旋这一内禀属性。

在狄拉克推导出狄拉克方程之前，物理学用薛定谔方程来描述电子的行为。薛定谔方程是一个非相对论性的波动方程。其实，薛定谔在建立薛定谔方程时，目标是建立一个相对论性的量子力学方程。于是，他将相对论能量—动量关系的等式左右两边换为相应算符，再作用于波函数，得到了克莱因—戈尔登方程。虽然克莱因—戈尔登方程的推导比较合理，但其推导出的很多结论都不符合常理。比如，克莱因—戈尔登方程会推出负能解、负概率等不符合物理期望的结论。为了避免这些问题，必须把之前的关于时间二阶导数的方程改写为关于时间一阶导数的方程(即能量平方项变为能量的一次项)。狄拉克独辟蹊径，利用矩阵对方程“开平方”，成

功地把相对论性的量子力学方程改写为了关于时间一阶导数的方程，即狄拉克方程，它同时满足相对论能量—动量关系。

狄拉克通过求解方程发现，先前的电子角动量算符不再与哈密顿量算符对易，而是电子角动量算符与新增的一项之和与哈密顿量算符对易，说明角动量与新增的一项的和是守恒量。这也说明新增的一项也具有角动量的属性，是一种特殊的角动量。这个角动量就是我们前面提到的实验上发现的“自旋”！从此，自旋便从理论上自然地得到了。由于电子自旋是从相对论性量子力学方程——狄拉克方程推导出来的，因此电子自旋也是一种相对论性的量子效应。此外，尽管自旋角动量自身不一定守恒，狄拉克通过求解方程却得出了另外一个守恒量，即自旋的“涡旋性”。简单来说，平面波的自旋在传播方向的投影在运动中保持不变。这个特性可以称为“纵向自旋”的守恒律。

绕了一大圈，大家发现自旋与经典的带电物体的旋转原来不是一回事。后期人们对电子自旋展开深入研究后，还发现了电子的反常磁矩，进而促进了量子电动力学的建立。如此说来，小小的自旋还真是现代物理学的大功臣。

4 电子自旋与中国磁学

前面我们介绍了自旋的发现史，那么自旋和物质的磁性之间有什么关系呢？在磁学理论发展过程中，人们曾认为圆周运动的电荷所构成的环路电流是磁矩的主要来源。根据这个猜想，电子绕原子核运动所产生的轨道磁矩 m 可以用经典的公式 $m = -e\mu_0 r^2 \omega / 2$ 来表示，其中 r 为圆周运动半径， ω 为圆周运动

的频率。对应的，这种经典的表达式也可以转换为量子力学的表达式 $\langle m^z \rangle = -e\mu_0 \hbar L_z / (2m_e)$ ，其中 μ_0 为真空磁导率， $\hbar L_z$ 为角动量算符 \hat{L}_z 的本征值， \hbar 为约化普朗克常数， $\hbar = 1.055 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 。这样就能定义玻尔磁子 $\mu_B = e\mu_0 \hbar / (2m_e) = 9.274 \times 10^{-24} \text{ A}\cdot\text{m}^2$ 。另一方面，前文介绍了电子本身带有内秉角动量，即自旋带有半整数的自旋量子数，所以角动量为 $\hbar/2$ 的电子自旋可以产生一个磁矩的最小单位——玻尔磁子，它的磁矩是 $\langle m_s^z \rangle = -2\mu_B \langle s_z \rangle / \hbar$ 。因此电子的总磁矩是其轨道磁矩和自旋磁矩之和。值得一提的是，这里忽略了原子核磁矩，它与 μ_B 的比值为电子与质子的质量比，即 $1/1836$ 。因此，相比于电子磁矩，原子核磁矩对于固体的磁性没有显著的贡献。虽然材料中有大量的电子，每个电子都具有磁矩，但是如果每个电子的磁矩随机排列，宏观上也不会表现出磁性。因此，在磁性材料中，电子之间需要有一个有效的媒介，将它们耦合起来，这就是我们下面所说的自旋间交换相互作用。

同样在1928年，磁学中还有一个非常重要的历史性突破。德国科学家维也纳·海森伯提出了一个基于自旋交换相互作用的量子模型，这个模型成功地解释了在20世纪初法国科学家外斯所提出的分子场的假设。外斯分子场假设唯象地解释了自发磁化的现象：他猜测在物质的内部有一个神奇的“磁场”，这个磁场将原子磁矩整齐地

排列起来，导致了宏观的自发磁化现象：即便没有外磁场存在，材料仍然表现出磁矩的有序排列(图3)。人们利用这一唯象的理论进行估计发现，如果温度达到一个特定的温度(居里温度)时，自发磁化就会消失，此时原子磁矩随机热运动的能量将与分子场的塞曼能相当。由此可以估计分子场的大小约为800 T (800万高斯)，这比中国科学院合肥强磁场中心创造的稳态磁场世界纪录45.22 T还高一个数量级！更是比地球这个超级大磁体的地磁场(通常约为0.5高斯)强1600万倍。是什么造成了材料内部这么大的分子场呢？根据海森伯的量子理论，这种分子场可以被解释为由自旋间交换相互作用所产生的有效磁场。交换相互作用源于电子之间的库仑相互作用，由于两个自旋相同的电子无法出现在空间同一位置，这导致一个有效的相互作用使得处在相近原子的电子自旋产生耦合。可以这样说，引入强烈的短程交换相互作用标志着现代磁学理论的诞生。交换相互作用导致了自旋的平行排列(铁磁性)和反平行排列(反铁磁性)，此外电子自旋可以和电子的轨道运动发生耦合，从而产生一定的轨道磁性。这一耦合也将自旋和晶格关联起来，使得它们可以交换能量和角动量。自旋—轨道相互作用也是

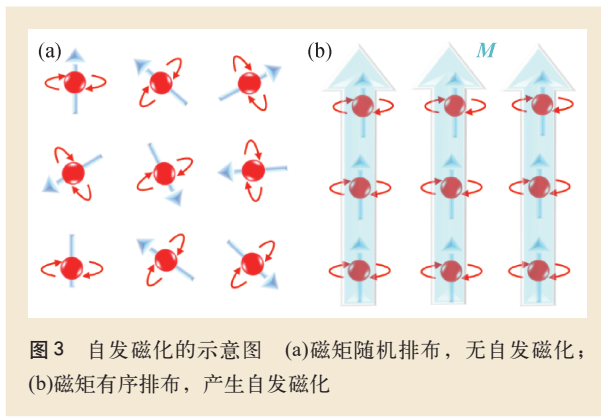


图3 自发磁化的示意图 (a)磁矩随机排布，无自发磁化；(b)磁矩有序排布，产生自发磁化

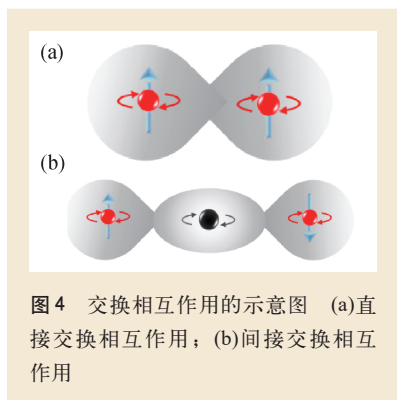


图4 交换相互作用的示意图 (a)直接交换相互作用；(b)间接交换相互作用

磁各向异性的起源，因为交换相互作用本身具有各向同性，只有将自旋和晶格耦合起来才能在空间上“锁定”宏观磁化，产生我们熟悉的磁性材料。

自旋之间的交换相互作用导致磁性材料的磁矩有序地排列起来，这些磁矩散发出的磁力线共同构成了“异性相吸、同性相斥”的磁铁。我们的日常生活中充满各种各样的磁铁，小到手机、电脑里的扬声器与传感器，大到汽车发动机、风力发电机、磁悬浮列车等等，我们的一生要和数不清的磁铁打交道。可以说，评价一个设备的先进性可以用该设备中使用的磁性材料的数量来衡量。同时，这要求磁铁要应对更多复杂的环境，有更好的磁性能。在元素周期表中能对磁性有贡献的元素主要有两类：一类是3d过渡族元素，例如铁、钴、镍等，磁性来源于3d电子的自旋。它的特点是交换相互作用强、在常温下饱和磁化强度高、居里温度高；另一类则是稀土过渡族元素，例如钕、钐、铽等，它的磁性来源于电子壳层内部的电子自旋，它的特点是磁晶各向异性很强，但是居里温度很低。如果把这两类元素结合起来，就像农业中的杂交品种，可以培育出人们所期望的同时具有高磁化强度、高居里温度和高磁晶各向

异性的材料，而这正是现代磁学的重要发展方向。

现代磁学这一古老又年轻的学科在工业革命后由西方传入中国。新中国开展现代磁学研究的第一位学者是叶企孙先生，他是中国近代物理学奠基人、中国物理学界的一代宗师。1923年叶先生从哈佛大学获得博士学位，他的博士论文题目就与磁性相关，叫做《静水压力对铁、钴、镍磁导率的影响》(*The effect of hydrostatic pressure on the magnetic permeability of iron cobalt and nickel*)。叶先生担任北京大学磁性教研室主任，从无到有建立了北京大学磁学专门化的教学体系，于1958年开始系统地讲授磁学课程。叶先生讲授的铁磁学和磁性量子理论等课程在国内属于首次开设。当时磁学专门化的课程主要分为两部分，理论课程由叶企孙、施汝为、潘孝硕与向仁生等几位磁学前辈负责，而实验课程由胡国璋、廖莹、何从望等几位磁学前辈开始建设。叶先生不仅采用启发式教学鼓励学生从现象发现本质，而且注重实验和理论相结合，引导学生思考从而得出结论，使学生学到分析和解决问题的方法。在叶先生的影响下，许多学生经过磁学的专门训练，学过系统的磁学课程，毕业后多半成为了中国磁学的骨干力量。此后，南京大学、山东大学、兰州大学、吉林大学等国内多家高等院校物理系也建立了磁学专门化。笔者从华中科技大学校史馆看到华中科技大学在20世纪六、七十年代建有磁性材料与器件教研组，从事微波铁氧体相移调制器等的研究。从此现代磁学开始在中国生根发芽，为中国磁学的发展培养了一大批磁学人才。

5 自旋电子学与自旋手性

回顾历史我们会发现，人们对自旋的认知和应用贯穿了许多人类历史上的大事件。首先，古人发明了指南针后，世界开始进入了大航海时代。指南针(铁氧体)背后的机理是自旋之间的相互作用：在铁氧体中铁离子的3d电子的自旋通过将氧离子作为媒介实现“隔山打牛”，将相互作用传递到另一个3d电子自旋上实现了间接交换相互作用，如图4所示。这一相互作用诱导铁氧体材料实现了自发磁化，而这种自发磁化在地球地磁场的影响下始终指向南极和北极，从而指引着人们在茫茫大海中找到了前进的方向。其次，可以将时间线继续往回追溯到工业革命。人们利用铁磁金属之间的直接交换作用，制备出了铁磁材料并利用它们制作出发电机、电动机和变压器等现代电器，为工业革命奠定了基础。这样看，磁性这一学科确实是一个古老的学科。

进入21世纪后，电子信息技术快速发展，人类进入了信息大爆炸的时代。在数字信息技术中，数据以“0”和“1”二进制的方式进行存储。由磁性材料构成的小磁体，由于是自旋的集体“列阵”，具有自旋“向上”和“向下”两种状态，而且自旋的方向不会轻易消失或者改变，即使不通电也能保持原有的状态。这使得小磁体成为了非常理想的存储二进制信息的物理介质。例如我们日常生活中使用的磁带、磁硬盘等设备，都是基于这个原理。

随着时代的发展，人们对信息存储密度、速度和能耗的要求也在不断提高，也就意味着每个小磁体的尺寸要越来越小、磁体的磁矩密度要越来越高、自旋翻转的速度要

越来越快。小型化、大容量、高密度成为推动电子技术更新换代与信息革命的源动力。这要求人们能对微纳尺寸的小磁体进行高效操控,驱动人们研究调控自旋运动的机制,希望能够更好地操纵电子的自旋,实现信息的可靠读取和高效写入。磁电阻(MR)效应是一个早被人们熟知的现象,铁磁性金属的磁电阻效应被广泛应用在磁传感器上。1988年,法国科学家阿尔贝·费尔和德国物理学家彼得·格林贝格尔分别独立发现,当两层磁性薄膜中间夹着一层非磁性材料时,如果两层磁性薄膜的自旋磁矩方向由反平行变为平行,电阻会发生巨大的变化,这就是巨磁阻效应(GMR)。后来人们利用巨磁阻效应研发出了自旋阀结构,极大地提高了磁硬盘读取的能力,为高密度磁硬盘的制造铺平了道路,二人也因此获得了2007年的诺贝尔物理学奖。相继地,人们又在锰氧化物中观察到了庞磁阻效应(CMR)和与自旋相关的隧道磁电阻(TMR)效应,进一步充实了磁电阻家庭。人们对于磁电阻的关注主要源于应用技术的需求,由于磁电阻传感器具有灵敏度高、功耗低、小型化、大容量、廉价、稳定可靠,以及对温度变化和粒子辐照等恶劣环境的强大耐受力的优点,使得它在传感器、磁存储等领域中占据了重要的位置,具有不可替代的优越性。

巨磁阻效应的发现也开创了一个以电子自旋为核心的新兴学科:自旋电子学。这个学科关注走向更小、更精细、能标更低的电子学器件,包括(不限于电子的)自旋流的产生、传输和操控,在其中发现了很多新奇的物理效应,比如自旋转移力矩效应、自旋霍尔效应、自旋

泵浦效应、自旋塞贝克效应、自旋能斯特效应等,并涌现出一系列具有优异性能的磁电子器件,比如磁随机存储器、磁振荡器、磁随机发生器等。这些磁电子器件具有响应速度快、非易失性、良好的耐久性和扩展性,以及与现代CMOS技术相兼容等优势,被学界和产业界寄予厚望,被认为是后摩尔时代的关键纳米技术之一。

在自旋电子学中,驱动自旋装置运作的不一定是磁场和电流,还可以是“自旋流”。根据现代物理理论,电荷守恒是由于体系哈密顿量具有 $U(1)$ 对称性。因为这一对称性的限制,电荷不会无缘无故地产生,也不会无缘无故地消失,只会从一个地方流动到另一个地方,也就是形成电流。电流可以有效地驱动各种各样的电子电器运转。这就自然地产生了一个问题,作为电子的另一个本征属性,这里所讨论的电子自旋是否也是守恒的?如果自旋角动量也不会无缘无故地产生或者消失,那么它是否会形成自旋流,并用来驱动各种“自旋”设备运转?正如上文中我们所提到的,狄拉克最早指出电子自旋角动量和轨道角动量之和与哈密顿量对易,是一个守恒的物理量,这是由体系的 $SU(2)$ 对称性所保证的。这意味着电子自旋角动量自身不一定是守恒量。只有当电子自旋角动量不与它的轨道角动量耦合时,自旋角动量和轨道角动量才是分别守恒的。因此,在没有(弱)自旋轨道耦合的体系中,我们可以认为自旋角动量和轨道角动量都近似守恒,形成自旋流和轨道流,驱动自旋装置运转。这一概念引发了自旋电子学和轨道电子学的研究热潮。此外,这种自旋—轨道耦合也是很重要的。

比如说,它可以用来实现电荷流与自旋流之间的高效转换,将电子电荷的定向运动转化为电子自旋的定向运动,反之亦然。这种奇妙的对称性关系引起了人们的研究兴趣,也促进了磁电子学或者自旋(轨道)电子学这一学科的蓬勃发展。

以自旋电子学为基础的交叉学科是一个百花齐放的研究领域。这里笔者以自己研究的手性自旋电子学为例对自旋电子学最近在自旋手性方面的发展做一个介绍。手性是自然界普遍存在的属性。让我们回到手性的数学定义来讨论这一问题。所谓手性,指的是三个互相垂直的矢量按照“手性螺旋法则”锁定在一起,比如中学学到的左手坐标系和右手坐标系就表示两种手性螺旋法则。这一现象往往表现在矢量之间的叉乘关系中。例如,考虑经典旋转陀螺在重力场 F 提供的扭矩作用下的进动。陀螺的机械角动量 L 、力场 F 和进动方向 τ 遵循右手定则 $dL/dt = \tau \times L \times F$ 。类似地,在磁场 H 中的磁矩 M 运动符合朗道—栗夫席兹方程 $dM/dt = -\gamma\mu_B M \times H$,其中 γ 为电子的回旋磁比,具有固定的旋向性。

手性的最早研究可能起源于对自然界藤本植物茎蔓的研究。达尔文在《攀缘植物的运动和习惯》一书中罗列了多种攀缘植物左旋和右旋的生长特性。后来,科学家们还在光学、分子结构、蛋白质结构等系统中发现了手性的特征。在本文探讨的自旋系统中,手性特征既出现在静态自旋结构的手性排列中,也出现在自旋激发的动态手性结构中。

静态手性自旋结构可以用于构筑具有特殊“拓扑”性质的磁结构,例如磁斯格明子,它是一种纳

米尺寸的磁孤子。“拓扑”在数学上指的是在连续变形下保持不变的固有性质，因此具有特殊“拓扑”性质的磁结构往往在外界扰动下比较稳定。如果把磁斯格明子的自旋排列映射到球面上，会发现自旋的排布可以像一只刺猬一样，每个自旋仿佛刺猬的尖刺一样排列，如图5(a)所示。由于磁斯格明子具有固定的手性，因此它可以在电流的驱动下快速地移动，被认为是下一代高密度数据存储的载体。同时，静态自旋结构中还可以存在具有手性的自旋耦合效应^[1, 2]，帮助构建更高效的存储器和运算器。在常规的自旋耦合效应中，两个自旋倾向于平行或者反平行方式排列，但是由于一种反对称交换相互作用——Dzyaloshinskii—Moriya相互作用的存在，近邻的两个自旋倾向于以相互垂直的方式排列。这种相互垂直的排列方式具有手性特征，其左手或者右手的手性往往由材料决定。像图5(b)中展示的，对于一个水平自旋和一个垂直自旋组成的系统，它们总是以同一种手性排列。笔者在研究中发现，这种手性自旋耦合可以用

来构筑逻辑运算器件，如图5(c)所示。在笔记本、手机等数字设备中，数据在芯片上都是进行布尔逻辑运算。常见的逻辑运算包括与、或、非、与非、或非等，数学上可以证明这些逻辑运算的组合可以实现复杂的运算功能。通过设计自旋的排列方式，人们可以设计出不同的逻辑功能。有意思的是在自旋逻辑器件中，既有逻辑运算的功能，又有信息存储的功能，因此这是一种存储和计算一体化的新架构。这种新型计算架构可以消除传统计算机中数据在存储单元和计算单元之间传输所带来的延时和高能耗，有望实现更高性能和更低能耗的芯片。另一方面，我们最近几年的系列研究表明^[3-10]，除了上述静态的自旋手性结构^[1, 2]之外，还存在自旋的动态手性^[11]。在材料中，电子的自旋可以和它的动量锁定起来，以至于向左运动的电子和向右运动的电子的自旋相反，这种效应被称为自旋—轨道耦合。现在推广电子的自旋到其他的粒子，例如光子具有两种圆偏振，我们可以将其视为自旋。另外的例子是磁性绝缘体材料

中的磁振子，其本身携带自旋角动量。声子在特殊情况下也具有圆偏振，比如在介质材料表面运动的表面声子。动态的手性指的是各种元激发准粒子，如凝聚态物质中常见的磁振子、声子、光子等的自旋 S 、动量 k 及它们运动平面的法线方向 n ，三个矢量按照左手或者右手螺旋法则锁定起来。

那么为什么这些载流子会涌现出这样的自旋锁定或者自旋手性呢？首先需要弄清这里所说的自旋是垂直于动量传播方向的，这种自旋称为“横向自旋”。比如图6(b)所绘出的这种情况。为了比较，图6(a)也绘出了前文提到的“纵向自旋”，或者称为螺旋性的情况，即自旋 S 与动量 k 是平行的。那么哪些情况会出现横向自旋和手性呢？这里有三条“定理”给出了一个原则。

第一，无散度的矢量场“倏逝波”，或者简单来讲，表面波，都具有横向自旋，并且这个横向自旋是与动量及它们运动平面的法线方向锁定起来的。这个可以通过简单的矢量运算进行证明。我们需要认识到这里考虑的矢量场 C 都是无散度的，即 $\nabla \cdot C = 0$ ，例如对于磁矩 M 、电场 E 、磁场 B 和应变 u 等，满足：

$$\begin{aligned} \nabla \cdot M &\approx 0, \quad \nabla \cdot H = 0, \\ \nabla \cdot E &= 0, \quad \nabla \cdot u = 0. \end{aligned}$$

当自旋方向与运动方向(假定沿 y 方向运动)垂直时，这样一个无散度的场要求 $C = C_y (\frac{ik_y}{\kappa}, 1, 0)^T e^{ik_y y - \kappa x}$ ，其中 k_y 为波沿 y 方向传播的波矢， κ 表征倏逝波沿 x 方向衰减的速度。读者可以验证这个场没有散度。这样的场带有的横向自旋密度为 $S_T \propto \text{Im}(C^* \times C) = -2(k_y/\kappa) |C_y|^2 e^{-2\kappa x} z$ ，它与传播方向垂直，并且自旋方向与运动方向锁定。第二，当具有时

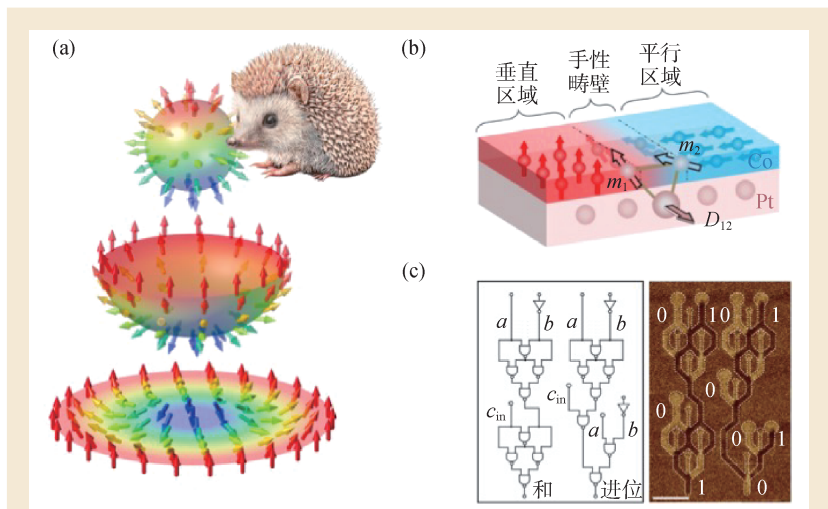


图5 静态自旋结构中的手性特征 (a)磁斯格明子；(b)手性耦合的自旋结构；(c)自旋逻辑电路

间反演对称时，固定准粒子传播平面 n ，我们即得到横向自旋和动量锁定的具体方式，比如图 6(c)所示，向右运动的波自旋是顺时针的，向左运动的波自旋是逆时针的。例如，表面声子可以沿两个方向传输，但是改变传播方向，它的自旋方向将改变。第三，当我们打破时间反演对称性时，比如图 6(d)所示，那么我们将固定横向自旋的方向，这种波在某个表面就只能单方向传输。磁性材料中的表面磁振子就属于单方向传输的这种情况。

正如任何一条规则需要有新的预言，这一动态手性不仅能够解释已发现的准粒子的自旋手性结构，它也能够做出新的预言。比如笔者最近研究的铁电材料的激发，即铁振子(ferron)，当处于表面态时，它产生的电场就表现出横向自旋和动量方向锁定的特性^[12]。

我们看到，横向自旋和动量可以锁定起来，这很类似于由于相对论效应所导致的电子与它的运动方向锁定的自旋—轨道耦合效应，所以这是一种广义的自旋—轨道耦合，但是它的起源不是来自于相对论效应。从基础科学的角度讲，这极大地拓展了我们利用自旋、操控自旋的自由度。

经过 30 多年的研究，科研工作者已经知道电子的自旋—轨道耦合对于自旋电子学及其在信息技术的应用非常重要，它是自旋电子学的基石，也影响了各种磁结构的静态手性。这里我们将自旋概念延拓到了其他载流子，并且由于自旋手性，有了广义的自旋轨道耦合。目前大家在常规凝聚态物质中已经发现了大量具有这样性质的载流子，比如表面磁振子、磁振子的偶极

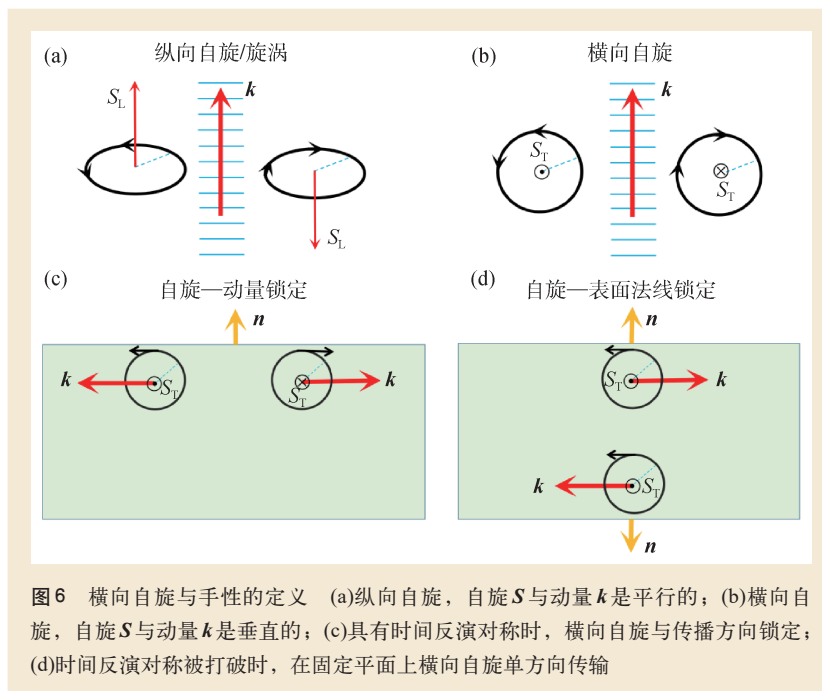


图6 横向自旋与手性的定义 (a)纵向自旋，自旋 S 与动量 k 是平行的；(b)横向自旋，自旋 S 与动量 k 是垂直的；(c)具有时间反演对称时，横向自旋与传播方向锁定；(d)时间反演对称被打破时，在固定平面上横向自旋单方向传输

场、近场的光子、表面声子、表面等离子激元、波导微波、铁电材料中的铁振子(ferron)等。一方面，这些准粒子作为载流子可以作为自旋的载体传输信息。可以证明这些载流子和外场的相互作用非常特殊，它是一种“手性相互作用”，即只有一个方向传播的载流子与外场耦合。这使得我们可以实现很多新的自旋功能，如载流子的单方向激发、基于自旋的二极管、逻辑运算器，等等。另一方面，横向自旋在不同载流子之间可以互相转化，这些载流子可以作为自旋的源来激发电子或者其他准粒子的自旋流。有了这些基本概念后，可以预期这将对未来信息技术应用具有重要意义：基本原理拓展后，众多准粒子都可以携带自旋流，并且能够用广义的自旋—轨道耦合效应进行调控，有望实现全新的器件功能。

手性相互作用引起了众多的物理效应^[3-10]。对于磁振子和磁纳米结构的耦合，可实现磁振子单方向的激发、热输运中的手性塞贝克效

应和磁振子的非厄米趋肤效应，等等。在微波和磁性材料耦合的系统中，可实现微波二极管和磁振子在边界的累积放大效应。对于磁振子和电子的耦合，正常金属通常会导致磁振子的手性耗散，而超导体可以阻塞或者全反射磁振子的传播。磁矩运动能够对表面声子进行单方向激发。我们还证明了微波的横向自旋和电子本征自旋是守恒的。在非线性区域，磁振子之间的相互作用将影响磁子色散，即单方向的自旋流导致磁子色散的多普勒效应。目前已经对上述基本原理给出了实验上的证据。总体来讲，手性产生于广义的自旋—轨道耦合这一基本原理得到了广泛的证实。这些进展可以从笔者最近在 Physics Reports 期刊上以“Chirality as generalized spin-orbit interaction”^[11]为题发表的长篇综述文章中找到。其中，笔者也系统对比了静态和动态手性相互作用。图 7 是 2023 年 4 月份三位作者在武汉的合影。

从基础研究到最终的技术应用



图7 论文“Chirality as generalized spin-orbit interaction”三位作者合影(从左至右: 罗昭初, 于涛, Gerrit Bauer)

最主要的挑战是从基本原理到器件的实现还有一段距离。手性自旋电子学未来有三个挑战:(1)有待实现众多的逻辑器件,比如逻辑门,还有其他的功能,比如磁化反转和二极管功能。对于材料,二维磁性可能是一个很好的选择,但是需要对提高材料制备的质量进行长时间摸

参考文献

- [1] Luo Z C *et al.* Science, 2019, 363(6434): 1435
 [2] Luo Z C *et al.* Nature, 2020, 579:214
 [3] Yu T *et al.* Phys. Rev. Lett., 2019, 123: 247202
 [4] Yu T *et al.* Phys. Rev. Lett., 2020, 124: 107202
 [5] Yu T, Bauer G E W. Phys. Rev. Lett., 2020, 124:236801

索。(2)载流子的手性预示着比二极管还要好的功能,就是波的单方向运动,即隔离器,这样开关比可以达到百分之百。现在实验上还需要寻找合适的参数空间来实现这一重要功能。(3)手性相互作用中能量和信息是单方向传输的,这意味着信号的积累会放大传感器的灵敏度。比如利用非厄米趋肤效应^[13]预言可以将灵敏度提高若干数量级。这些都有待在未来的器件中实现。

6 结语

展望未来,束缚在量子点上的电子自旋有可能成为未来的量子信息存储单元——量子比特,有可能

实现大规模的量子计算。动态自旋手性和耗散现象的结合也引起了“非厄米拓扑磁子学”这一方向的发展,理论工作者已经预言了磁振子的非厄米趋肤效应、磁振子的反常散射以及不表现能级劈裂的磁振子——光子极化子^[13]等新现象。笔者认为自旋手性在未来还有众多的物理效应和潜在应用有待挖掘。随着人们对电子自旋的了解更加深入,我们相信这个永不停歇的“小陀螺”也会迸发出更多的能量,带来未来的无限可能。而我们作为新一代磁学人,也要承担起个人使命和责任,抓住自旋的物理本质,书写自旋的华章。

致谢 特别感谢北京大学物理学院杨应昌院士提供的宝贵资料,并对本文的指正。

- [6] Zhang X *et al.* Phys. Rev. Lett., 2020, 125:077203
 [7] Yu T *et al.* Phys. Rev. Lett., 2021, 126: 137202
 [8] Yu T *et al.* Phys. Rev. Lett., 2021, 127: 127001
 [9] Yu T, Bauer G E W. Phys. Rev. Lett., 2022, 129:117201
 [10] Yu T, Zeng B W. Phys. Rev. B, 2022,

- 105:L180401
 [11] Yu T, Luo Z C, Bauer G E W. Phys. Rep., 2023, 1009: 1
 [12] Zhou X H *et al.* Chin. Phys Lett., 2023, 40:087103
 [13] Yu T *et al.* Phys. Rep., 2024, arXiv: 2306.04348