

笼目晶体中探索未知量子态

殷嘉鑫[†]

(南方科技大学物理系 深圳 518055)

2023-02-11 收到

[†] email: yinjax@sustech.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20230301

Exploring hitherto unknown quantum phases in kagome crystals

YIN Jia-Xin[†]

(Department of Physics, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

摘要 笼目起源于古老中华民俗文化。近期学者们对具有笼目晶格的一系列拓扑材料的研究揭示了量子层次上几何、拓扑、自旋和关联的交缠相互作用，以及随之涌现的丰富多彩的量子现象。文章简要介绍了笼目晶格的相关理论概念、陈数和外尔磁性、平带关联现象，以及非常规电荷序和超导电性中的谜团。当前，国际上诸多研究机构使用各式手段对笼目磁体和超导体的研究盛况犹如正在举行一场笼目量子派对。然而，这些初步研究还无法突破超导和量子霍尔两大类宏观量子现象。希望此文能激励更多年轻学者在笼目晶体丰富的演生现象中进一步探寻第三类宏观量子现象，迎来真正的量子盛宴。

关键词 第三类宏观量子态，笼目材料，笼目磁体，笼目超导

Abstract Kagome originated from ancient Chinese folk culture. Recently, the study of a series of topological materials hosting kagome lattices has revealed quantum interactions between geometry, topology, spin and correlation, as well as rich emergent phenomena. In this article I will briefly describe some key developments in this field, starting from the fundamental concepts of a kagome lattice, then moving to the realization of Chern and Weyl topological magnetism, to various flat-band many-body correlations, and finally to the puzzles of unconventional charge ordering and superconductivity. The worldwide research on kagome magnets and superconductors appears to be holding a quantum party on kagome lattices. However, these preliminary researches still cannot transcend superconductivity and quantum Hall physics. I hope this introduction can inspire more young researchers to explore and discover the third macroscopic quantum phenomena through exploring the emergent matter in kagome lattices, and embrace a true quantum celebration.

Keywords macroscopic quantum states of the third kind, kagome materials, kagome magnet, kagome superconductivity

1 引言

笼目图案由顶点互相连接的三角形构成，它在东方的传统民间器物和西方的古老宗教文化中都有体现^[1]。然而，笼目晶格在自然界却没有直接的对应，似乎是由人类智慧所创造的。图1是笔者在深圳中华民俗村随机拍摄到的一张具有笼目图案的照片，还记得儿时玩的蝓蝓笼子大部分也含有竹条编制成的笼目图案。2022年，中国考古学家在对冬笋坝遗址的修复工作中发现了极为罕见的2200多年前的竹编织制品(图2(a))。尽管这项考古发现的新闻报道中并未提及它的特殊几何构型，但笔者观察到其图案正是笼目(相信读者也很容易识别其中的笼目图案)。这项考古发现为研究笼目晶格的文化起源提供了重要的时间节点依据，即任何其他起源的学说(如日本文化起源假说)需提供早于该时间节点的考古学证据。笼目图



图1 笔者在深圳中华民俗村拍摄到的笼目图案



图2 (a)中国古代竹编织的笼目图案；(b)古犹太教中的笼目图案；(c)笼目晶体 $TbMn_6Sn_6$ 照片

样也常见于西方宗教文化和神秘学。在西方古老犹太教中类似于笼目图案的大卫之星(图2(b))出现在1000多年前。在西方古老炼金术中，笼目图案的几个顶点也被用于代表六种基本的化学元素。从另一个角度看，笼目图案也可由两个互倒的三角拼成，类似中华道教文化中的“阴”和“阳”。正是因为笼目图案这种“神秘的气场”，我们也经常在一些描述超自然力量的欧美影视作品中看到它，其中，笼目有时作为神圣一方的圣坛图案，有时也是邪恶一方的恶灵图案。

近几十年来，科学家开始不断地在具有笼目晶格的固体中发现一些新颖量子态和效应^[1-3]，如量子自旋液体，陈数和外尔磁性(对应于反量子霍尔效应)，多种平带关联现象，以及非常规电荷序和超导电性等等，使之在人类当前认知的量子世界中大放异彩。本文主要介绍导电笼目材料(如图2(c)所示的一种笼目晶体，表面有金属光泽)中，由笼目晶格特殊电子结构产生的一些新奇量子现象的前沿研究进展。目前的研究大多可以归结到超导和量子霍尔效应两大凝聚态物理研究范畴。通过对这些前沿研究的介绍，希望能进一步激励年轻人的探索精神，实现人类第三类宏观量子态的发现突破。

2 笼目电子的摇篮

晶格中统计力学研究的经典案例是，Onsager于1940年在四方晶格中对Ising模型磁性相变的严格解。学者们很快把这种方法拓展到了三角晶格、蜂巢晶格，最终到笼目晶格^[6]。1951年，日本科学家Syozu Itiro发现，不同于铁磁的情况，如果考虑近邻反铁磁相互作用，那么笼目晶格下的Ising模型就不会发生磁性相变。现在来看，反铁磁相互作用下，笼目晶体中自旋的磁性阻挫已经成为物理学家的广泛共识。人们还借助这种性质进一步提出，在笼目材料中有可能实现各种形式的量子自旋液体。然而，这些都是基于Heisenberg自旋图像下的研究。早在1930年，关于量子磁性的起源就有两大派系。不同于Heisenberg局域自旋的观点，Stoner提出磁性来源于巡游电子的集体激发行为。在这样的大背景下，1991年德国科学家

Mielke Andreas 率先研究了笼目结构下的 Hubbard 模型^[7]，并发现笼目晶体的平带电子结构可以导致体系出现铁磁基态。终于，通过跨越近半个世纪的量子磁性研究，科学家揭示出笼目晶体的典型电子结构(图 3)，并逐渐开始展露它的各种量子演生特性。

3 笼目电子的相关物理概念

笼目晶体典型的电子能带结构具有三个特征：位于布里渊区拐角的狄拉克锥，位于布里渊区边界中心的范霍夫奇点，和布满整个布里渊区的平带。其中，狄拉克费米子赋予了能带拓扑性质；范霍夫奇点则会导致电子的不稳定性并使之趋于形成长程多体关联电荷序；平带引入了关联效应，例如磁性。理论上对笼目电子演生物理性质的理解借鉴了很多来自拓扑绝缘体和高温超导体的研究经验，主要分成能带拓扑和电子关联两大类性质。

拓扑研究中比较早的一个想法是，在笼目晶格的每个三角形增加一个 π 通量后，狄拉克锥会打开一个能隙，平带和非平带相连接的地方也会打开一个能隙，最后导致三个能带由上往下携带 $C = \pm 1, 0, \mp 1$ 的拓扑陈数。每个填充后的能带由此贡献和其陈数 C 相关的量子化的霍尔电导率。这个通量可以来自非共面手性自旋结构导致的自旋 Berry 相位，较早由 Nagaosa Naoto 等在 2000 年提出^[8]，然而具有这种特殊磁结构的材料还比较少见。随着自旋霍尔效应和 Z_2 拓扑概念的建立，一种 Kane—Mele 形式的自旋轨道耦合被引进到笼目电子的研究中。这种耦合会为具有反方向的自旋电子带来相反的通量，并打开自旋陈数能隙。这样的能隙打开在狄拉克锥和平带与非平带相切的位置，同时带来受时间反演对称性保护的螺旋边缘态。进一步引入面外铁磁作用后， Z_2 的能隙则变为陈数能隙；与此同时，笼目晶格则带有与之对应的手性边缘态(图 4(a))。这种预测较早由张首晟等人在 2015 年提出^[9]。在很多笼目晶体中，都具有一定的自旋轨道耦合并会发生自发磁化现象，使得这种奇特的拓扑态的实现成为可能。当费米

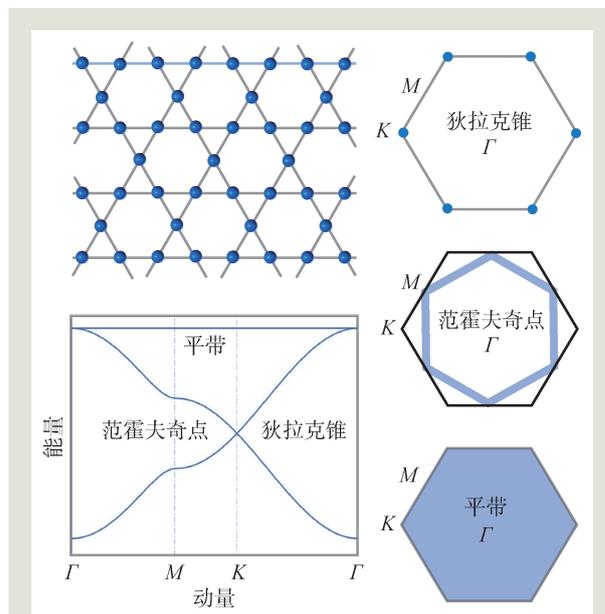


图3 笼目晶格和它的电子结构特征

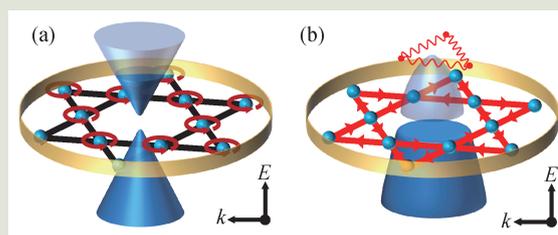


图4 (a)自旋轨道耦合带来的拓扑；(b)电子关联带来的拓扑

能恰好在陈数能隙中时，系统会展现出量子反常霍尔效应；当费米能偏离能隙，但偏离的距离和陈数能隙在同一个数量级时，系统会展现出巨大反常霍尔效应。笼目磁性实验研究中也确实常有报道巨大反常霍尔效应。因为 Kane—Mele 的自旋轨道耦合的微观形式正比于面外磁矩分量，当笼目晶体的磁化主要发生在面内时，则会通过竞争作用关闭打开的拓扑能隙。这种自旋轨道调控特性提供了一种有效的针对拓扑笼目磁体的量子调控方法，较早由汪自强等和普林斯顿学者在 2018 年提出^[10]。现实中的笼目材料大多是三维体系，当材料的层间耦合比较弱时，上面的讨论可适用于三维材料中的每层笼目晶格。当材料的层间耦合比较强时，能带在 z 方向的色散也会增加，这样陈数能隙可能会在某个三维动量关闭，形成外尔点，引导出磁性外尔物理，较早由颜丙海等在 2017 年提出^[11]。

与拓扑物理平行发展的是笼目晶体中的关联物理。自从发现了铜基和铁基高温超导体，多体相互作用被广泛认为是理解物质各种新奇量子态的核心。对于笼目材料，最早的关注点就是如何去实现平带的关联物理。例如，刚刚讨论到，学者们发现笼目电子平带的时候就意识到笼目平带可以导致材料的铁磁基态(也确实有很多笼目材料具有铁磁基态)。另一方面，平带又表现得有些像一个自发的朗道能级，而朗道能级的部分填充有可能实现分数量子霍尔效应。刚刚我们提到，在面外铁磁和自旋轨道耦合的共同作用下，平带和非平带相切的地方也会打开一个陈数能隙。文小刚等据此在2011年提出，当存在这些相互作用且部分填充平带时，有可能会实现高温分数量子霍尔效应^[12](顺便还引出了之后热门的笼目材料 Fe_3Sn_2)。紧接着对这些平带的研究，学者们开始关注范霍夫奇点可导致的新奇物态。范霍夫奇点附近，笼目电子的费米面具有平行线的结构，导致费米面形成嵌套，而实空间中这种嵌套的波矢对应于 2×2 的扩胞。2012年，李建新等提出笼目范霍夫奇点会导致破坏时间反演对称性的手性超导和自旋密度波^[13]；2013年，王强华等提出笼目范霍夫奇点会引导出一系列电荷密度波，其中，有些破坏旋转对称性具备向列序性质^[14]；而Thomale也在2013年提出笼目范霍夫奇点会导致一种新奇的破坏时间反演对称性的电荷密度波^[15]。近些年人们的研究发现，破坏时间反演对称性的电荷密度波也有可能是在费米能处打开一个陈数能隙，并给笼目晶格带来拓扑性质(图4(b))。这种关联导致的拓扑会使笼目晶格携带轨道电流，类似于Haldane在1988年提出的实现量子霍尔效应的模型，又类似于Varma在1997年提出的解释铜基超导体赝能隙的循环流模型。学者们提出的这些不同的序都可能是超导的前驱相，因此和超导又是密切相关的。巧合的是，较早的一个研究笼目超导体的理论工作是李雅达等人在2009年提出的对笼目量子自旋液体进行掺杂，他们发现笼目超导态是破坏时间反演对称性的^[16]。因此，似乎这些早期关于时间反演对称性破缺的讨论预示着笼目磁体和笼目超导体的一些隐藏联系，值得大家

进一步思考和挖掘。

学者们在实现这些概念的过程中，采用了很多先进的实验手段去探测和表征笼目电子的行为。比如，磁性输运可以很好地探测相变和Berry曲率物理，但是它往往只对费米能处的电子结构敏感；角分辨光电子谱可以直观地探索能带色散关系，但是它又没有磁的分辨能力，且常常被磁畴因素干扰；扫描隧道谱可以在矢量磁场下探测局域态密度，但它往往只对最表面的笼目晶格敏感；散射手段可以很好地研究磁序和晶格畸变，但它常常又无法获取轨道和电荷的信息；第一性原理可以预测一些材料的拓扑分类，但关联和磁性又常常使真实的能带重整。因此，在实际研究中，经常需要这些互补的手段联合起来去判定一种拓扑的或者是关联的笼目电子现象。同时，每种手段也就都有机会去引领一个现象的原创发现。正是这种“淘金”的机会才吸引着大批学者在笼目晶体中利用自己的实验或者理论手段去建功立业。

4 陈数磁体

在笼目材料的实验研究中，几种过渡金属笼目晶格构成的磁性材料首先进入学者们的研究范围，如日本大阪大学学者推出的 Fe_3Sn_2 ^[17]，东京大学学者推出的 Mn_3Sn ^[18]，马普所、中科院物理所和中国人民大学学者推出的 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ ^[19, 20]等。这些材料的推出都是因为学者们率先发现了它们的巨大反常霍尔效应。其实，早在量子霍尔的理论研究中，人们已经对量子霍尔的拓扑起源或者说Berry曲率起源形成了初步共识。这种共识进一步被清华大学和中科院物理所发现的量子反常霍尔效应所加强。所以，对巨大反常霍尔效应一个比较自然的解释，就是去考虑笼目电子结构中拓扑能隙附近的Berry曲率效应。在 Fe_3Sn_2 中，麻省理工学院和普林斯顿大学的学者们分别利用角分辨光电子谱和扫描隧道显微谱确认了费米能附近的狄拉克锥结构^[10, 21]。然而，他们也发现， Fe_3Sn_2 的基态是面内反铁磁，不利于陈数能隙形成。另外，Fe的笼目晶格中心还有额外的Sn原子，可能会阻碍形成理想的笼目电子结构。

有鉴于此，普林斯顿大学和北京大学的学者推出了 RMn_6Sn_6 这个体系(R 是稀有金属)^[22]，其中 R 的巨大化学压力可以把 Sn 原子顶出笼目晶格，形成较为纯洁的笼目晶格。这个体系中 $TbMn_6Sn_6$ 具有独特的面外磁性，有可能提供一个理想的陈数能隙平台(图5(a))。扫描隧道显微镜发现，在施加磁场后， Mn 原子构成的磁性笼目晶格的电子态展现出独特的朗道量子化能级。对朗道能级的分析揭示出一个自旋极化的狄拉克锥态处于费米能以上不远处，且在狄拉克顶点打开一个大于室温对应电子能量的陈数能隙。角分辨光电子谱对占据态的测量也同步确认了狄拉克色散的存在。扫描隧道显微镜进一步发现，笼目晶格的边缘恰好在陈数能隙内显示出边缘态，且边缘态的散射被强烈抑制。最后，学者测量到了较大的反常霍尔效应，与谱学手段估算的Berry曲率导致的反常霍尔效应定量一致。至此，通过系统的体态—边缘态—反常霍尔的对应关系，学者们确立了量子陈数笼目磁体的一个典型案例。

Fe_3Sn_2 体系中一个意想不到的发现是关于电子向列序^[10]。一般认为，向列序是电子间存在关联相互作用的一个直观表现。普林斯顿大学和中科院物理所的学者们分别利用基于矢量磁场的扫描隧道显微镜和磁性输运联合发现了 Fe_3Sn_2 中的向列序。扫描隧道显微镜观测到一个能量随磁场移动的电子态，旋转面内固定大小磁场时，这个电子态的能量移动显示出一个二重对称性。 c 轴电阻在旋转面内磁场时也展现出一个二重对称性。进一步，扫描隧道显微测量的准粒子散射谱在零场下也显示出一个二重对称性(图5(b)上)。如果引入一个大 c 轴磁场，则准粒子散射谱恢复到六重对称性(图5(b)下)；如果引入一个较大的面内磁场，则准粒子散射谱的向列相的高对称方向会随着外加磁场转动；如果撤掉外加磁场，则准粒子散射谱又恢复到原来的向列相对称性。这一系列有趣的操作，显示出对笼目晶体对称性的有效量子调控。对这个现象的理论理解需要同时考虑到笼目晶格中的狄拉克锥、电子关联作用、外加磁场以及自旋轨道耦合，仍然是笼目晶体研究中一个悬而未决的理论问题。近期，来自不同机构的

学者们对上面提到的两类笼目体系又进行了深入的拓展和研究，更多有趣的现象不在此赘述。

5 外尔磁体

外尔费米子广泛存在于缺乏中心或时间反演对称性的三维材料中(图6(a))。外尔费米子是Berry曲率在三维布里渊区的“源”和“流”。在晶体的表面动量空间，一个特殊的费米弧会连接一对外尔费米子在表面的一对投影点。因为外尔费米子定义在三维动量空间，它的出现需要笼目材料具有较大的层间耦合。众多导电笼目磁性材料中， Mn_3Sn 是笼目晶格的直接堆积，而 $Co_3Sn_2S_2$ 层间有较强的 S^{2-} 离子键的连接，因此，它俩被广泛认为是外尔笼目磁体的优良备选材料。理论学

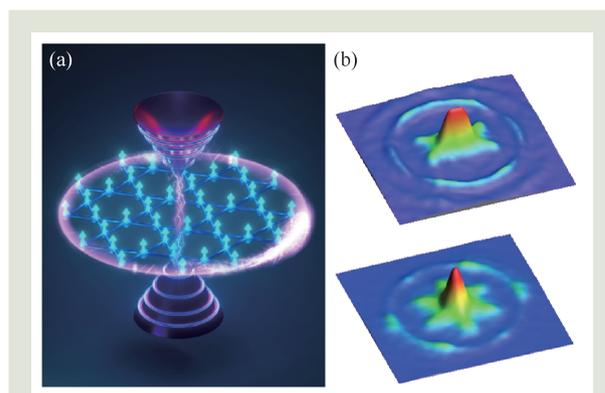


图5 (a)量子陈数笼目磁体；(b)电子向列序的量子调控，上图是零场下自发向列序存在的证据，下图是施加 c 轴磁场后对向列序的破坏

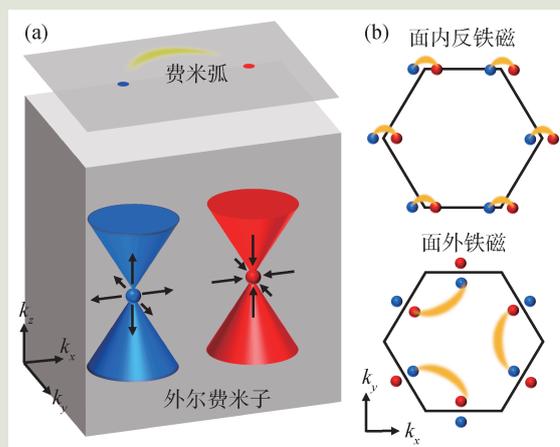


图6 (a)外尔费米子；(b)外尔笼目磁体 Mn_3Sn (上)和 $Co_3Sn_2S_2$ (下)的电子结构

家也根据 Mn_3Sn 的非共线面内反铁磁和 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 的面外铁磁结构计算, 预言了二者的外尔费米子和对应费米弧在动量空间的分布(图 6(b))^[11, 19, 20]。

Mn_3Sn 的优良特征使它展现出在室温、零磁场条件下的巨大反常霍尔效应的同时具备非常微小的磁矩^[18], 这些特征奠定了它无以匹敌的反铁磁自旋电子学应用前景。例如, 近期东京大学学者研发了一个基于 Mn_3Sn 薄膜和非磁性重金属薄膜的异质结, 通过对非磁性金属薄膜的电流控制可以有效地调节 Mn_3Sn 上的电磁性质^[23]。然而, 由于 Mn_3Sn 较强的关联效应, 它的电子色散包括理论预言的最关键的外尔锥还未被实验直接且清晰地观测到。与 Mn_3Sn 类似, $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 在低温下也表现出巨大反常霍尔效应^[19, 20]。不仅如此, 马普所的研究人员还发现它具有较大的霍尔角度, 也就更接近量子化极限^[19]。霍尔角的提高可能来自于它更干净电子结构。在第一性原理的指导下, 实验研究人员逐步发现了表面能带穿越费米能的奇数次^[24], 体电子结构的线性色散交叉^[25], 携带费米弧表面态的准粒子散射花样^[26], 自旋轨道耦合导致的能隙^[27], 磁转变对能带拓扑的影响^[28] 等等。

对于外尔笼目磁体当前的研究, 第一性原理起了非常重要的指导作用和穿针引线的作用, 然而, 也给实验研究带来了一丝不能引领科学进展

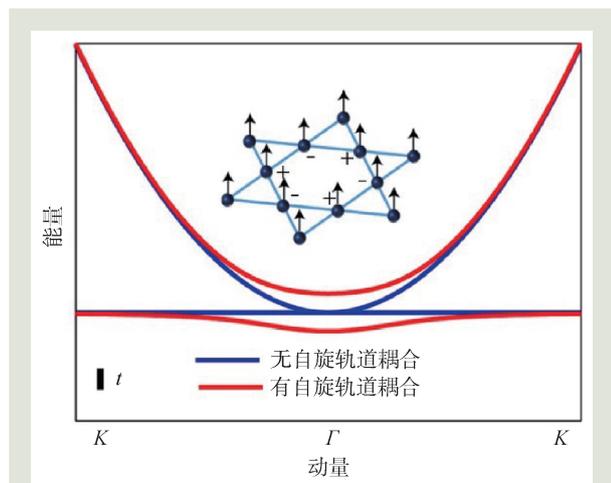


图7 拓扑平带。自旋轨道耦合导致能隙打开, 其中 t 代表电子在格点间跃迁能量, 红线和蓝线分别代表有和无自旋轨道耦合时的能带情况。插图中磁性笼目晶格中的+ -符号表示电子本征态的相位

的遗憾。这种遗憾对未来的研究可能也是一个好的契机: 不依赖第一性原理计算的情况下, 如何通过实验和模型分析来阐述笼目晶格、谱学数据和输运数据的内禀联系, 尤其是寻找谱学测量的能带结构和反常霍尔效应的量化对应关系仍然是值得继续进行凝练的科学问题。

6 平带关联

笼目能带结构不仅具有跑得非常快的电子(如狄拉克费米子、外尔费米子, 其速度可能仅仅比光速小一两个量级), 也具有跑得非常慢的电子——平带电子。平带常见于两类凝聚态体系: 一类是具有局域轨道的材料, 如重费米子体系; 另一类是具有阻挫晶格的体系, 如笼目体系。后者中, 平带来自晶格中不同格点电子波函数的相位相消。众多笼目材料中, 平带最为突出的是, 中国人民大学、普林斯顿大学和麻省理工学院学者们在2020年推出的 CoSn 笼目顺磁体^[29-31]。可能正是由于 CoSn 不具有磁性, 它的能带结构在实验中特别清晰(类似于图7的平带特点)。学者们用角分辨光电子谱和扫描隧道显微镜分别探索了平带与非平带的连接、平带的轨道特性、平带声子模与巡游电子的耦合等性质。

由于平带上电子的动能非常小, 这就突出了库仑相互作用的重要性, 导致很多关联效应的产生。中国科学技术大学学者在2018年综合利用角分辨光电子能谱、扫描隧道显微和第一性原理推断出, Fe_3Sn_2 的铁磁基态来自于笼目电子的平带关联效应^[32]。2020年麻省理工学院的学者也在 FeSn 反铁磁体的笼目晶格表面的类似能量处探测到电子平带^[33]。这些平带是否具有如图7所示的与非平带的特殊连接特性, 仍然值得研究。2019年普林斯顿大学与中国人民大学学者发现 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 磁体中费米能附近有类似于图7所示的拓扑特殊平带^[34]。考虑自旋轨道耦合后, 平带携带陈数, 并体现出Berry曲率导致的轨道磁性, 被基于矢量磁场的扫描隧道谱捕获。这种轨道磁性与之后的学者们在转角石墨烯中提出的平带轨道磁性不谋而合。2020年, 普林斯顿大学与东京大学

学者还进一步提出,在 Mn_3Sn 这种强关联笼目反铁磁体中,体系平带与巡游电子的耦合可类比于重费米子体系平带与巡游电子的耦合,在费米能处展现出多体共振态^[35]。近期,在转角石墨烯中,也逐渐出现这样的类比重费米子的概念。

7 电荷密度波与超导谜团

拓扑与关联的交织更多体现在笼目超导体中。2019年,笔者和合作者在 CoSn 材料中观测到强平带声子—电子耦合后,预言笼目晶体中的电声子耦合可以产生密度波和超导^[36],于是开始在文献中搜寻超导的笼目材料,并搜索到两种含有笼目晶格的超导材料 LaRu_3Si_2 (超导转变温度 $T_c = 7\text{ K}$)和 CeRu_2 ($T_c = 6\text{ K}$)。然而,这两种材料的层间耦合都比较强,不利于谱学研究。与此同时,加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校的学者们发现并推出了 AV_3Sb_5 ($A = \text{Cs, Rb, K}$)超导体系^[37, 38],虽然 T_c 大多在 $1\text{—}2\text{ K}$,但这个笼目超导体体系有比较明显的层状结构,且学者们逐渐发现它们还展现出一种电荷密度波序,转变温度可以达到 $T^* = 100\text{ K}$ 。他们利用输运和磁化率测量发现在 T^* 附近体系有奇异转变,推断可能是一个轨道序或者可能是电荷密度波序^[37, 38]。普林斯顿大学的学者与他们合作,利用扫描隧道显微镜发现了 2×2 结构超胞和电荷超胞,电荷能隙和电荷空间分布在能隙两侧的程度反转,由此确立了面内 2×2 电荷序(图8(a))^[39]。来自中国科学技术大学和橡树岭国家实验室的学者进一步分别利用扫描隧道显微镜和X射线散射发现了 $2\times 2\times 2$ 的三维超胞结构^[40, 41]。至此,学者们初步建立了笼目超导体内的 $2\times 2\times 2$ 的电荷密度波序,其中笼目晶格内的 2×2 电荷序波矢与早先理论讨论的笼目晶体范霍夫奇点填充的各种序的波矢不谋而合^[13, 14, 15]。

此后,学者们很快借鉴了其他相关电荷密度波超导体的有趣现象。比如,在 NbSe_2 材料中研究过电荷密度波对应的声子(晶格畸变)和费米面嵌套的联合作用,电荷密度波和超导的竞争,电荷密度波在超导态下促成电子对密度波;又如, TiSe_2 中也含有类似波矢($2\times 2\times 2$)的电荷密度波,在

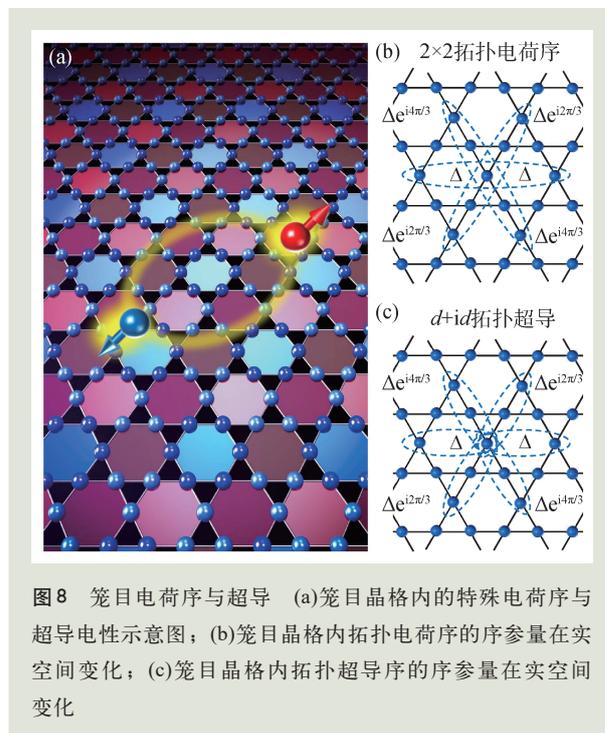


图8 笼目电荷序与超导 (a)笼目晶格内的特殊电荷序与超导电性示意图;(b)笼目晶格内拓扑电荷序的序参量在实空间变化;(c)笼目晶格内拓扑超导序的序参量在实空间变化

这个体系中出现过手性、向列态等特殊空间对称性破缺。这些研究经验又在笼目超导体中得以拓展和发扬,比较新奇的研究包括中国科学技术大学、中科院物理所、中国人民大学等推出的奇异压力超导相图^[42—44],中科院物理所和波士顿大学学者发现的电子对密度波^[45, 46]等等。

笔者在这里分享一类关于笼目超导体的拓扑电荷序的研究。这种特殊的序类比于提出拓扑材料中实现反常量子霍尔效应的Haldane模型,也类比于为了解释铜基高温超导体能隙而提出的环流场模型。普林斯顿大学学者利用扫描隧道显微镜发现 2×2 的波矢峰强度在笼目晶体的三个高对称方向都不一样,由弱到强,可以定义某种手性^[39]。这种手性数据在早期发表的很多扫描隧道文章中有体现,如中国科学技术大学的文章^[40]和波士顿大学的文章(与文章同时发表的审稿报告中^[45]),进一步地,他们发现这种手性可被磁场反转。由此,学者们抽象出了一种拓扑电荷序(图8(b)):即 2×2 电荷序在笼目晶体三个高对称性方向的序参量的相位相差 $\frac{2}{3}\pi$ 。这种旋转相位的电荷序破坏时间反演对称性,由此可推导出轨道电流、轨道磁性与反常霍尔效应。反常霍尔效应与

电荷密度波的联系很快被中国科学技术大学学者揭示^[47]，中国科学院物理研究所学者进一步提出了手性通量的微观模型^[48]，保罗谢尔研究所学者利用缪子散射观测到了电荷序导致的微小局域磁矩^[49]，宾夕法尼亚大学的学者利用 Kerr 谱也进一步验证了电荷序的时间反演对称性破缺^[50]，马普所学者观测到了手性输运，验证了材料体内的电子结构在低温时破坏时间反演对称性与镜面对称性^[51]。近期，莱斯大学和普林斯顿大学的学者又发现一种含有 2×2 电荷序的笼目磁体 FeGe，他们利用中子散射谱和其他先进精密谱学研究了电荷序与磁序的关联^[52]，并发现电荷序带有鲁棒边缘态^[53]，同样支持拓扑电荷序的图像。

值得一提的是，南京大学学者早在 2012 年提出的拓扑超导态^[13](图 8(c))与普林斯顿大学学者提出的拓扑电荷序有一个不谋而合之处。南京大学学者提出，笼目材料的超导若考虑同子格最近邻配对，很有可能是 $d+id$ 波配对。而这种配对模式的实空间相位分布也是在高度简并的三个笼目方向相差 $\frac{2}{3}\pi$ 。最近有一些高分辨实验给这种奇异配对对称性提供了一些支持^[54]，如角分辨光电子谱发现超导配对无节点与 $d+id$ 配对的特性相容；缪子散射实验发现笼目超导态破坏时间反演对称性，亦与 $d+id$ 配对特性相契合。对于电荷序和超导序在笼目晶体中出现相位旋转的本质认识还有待进一步探索。前面提到，笼目晶格格点上的电子波函数可以实现相位相消，形成平带，进而促成铁磁相变。笼目晶格内电子波函数的相位旋转和相位相消与时间反演对称性的内禀联系仍可能是前沿探索题目。对于超导配对对称性的研究，可能还要持续争论相当长一段时间。例如，目前有些实验表明非磁性杂质对笼目超导态影响不大^[55, 56]，似乎又支持笼目超导是寻常 s 波配对。然而，笼目磁体的研究中就出现过非磁性杂质导致局域磁矩的情况^[57]。笼目超导体中引入的非磁性杂质是否会和时间反演对称性破缺的电荷序相互作用产生局域磁矩，从而表现得类似磁性杂质？铁基超导的一些研究认为某些磁性散射对有相位变化的铁基超导态影响不大^[58]，那么相同的道理是否

可以用于解释非磁性杂质产生的演生磁矩对 $d+id$ 波超导破坏不显著的效应？这些可能仍是值得长期探讨的问题。

8 展望

量子笼目材料的研究刚刚拉开序幕。当前的研究任务已经有很多论述^[1-5]，例如去寻找能带结构更为纯净的二维笼目材料，并依托它来实现一些重要的理论预言。从近期历史经验看，这个领域应该仍有很多处女地供学者们开拓。例如，笔者近年来有幸与合作者在这个领域内提过一些新的名词，如拓扑笼目磁体(topological kagome magnet)，自旋轨道调控特性(spin-orbit tunability)，陈数笼目磁体(kagome Chern magnet)，拓扑电荷序(topological charge order)，笼目超导电性(kagome superconductivity)，笼目超导体(kagome superconductor)，笼目晶体中的量子派对(quantum party in kagome lattice)，量子演生(quantum emergence)，量子奇点(quantum singularity)等等，这些新的概念逐渐开始冲击其他的旧的研究课题，并不断吸引世界各地的人才和各个机构的科研基金，凝聚成一个独立的研究方向。

这些略显花哨的名称或概念中，“量子派对”的提法是借鉴了杨振宁先生在 20 世纪 80 年代对高能物理的一个论述“Party is over”(派对已过，或盛宴已过)。针对笼目晶体研究中年年都有不错的发现，笔者曾在一个针对笼目晶体举行的国际会议中提出笼目晶格上的量子派对，以此庆祝国际上不同机构在推动笼目晶体研究的重要贡献。然而，当我们在更宏大的层次上去再次思考杨先生的这个提法时，就会发现，当前的笼目材料研究中也隐藏着巨大的危机，即所有相关研究还是在超导物理和量子霍尔物理二者之间徘徊。当然，凝聚态物理其他方向的研究可能也不免有此困惑。笔者这里抛砖引玉作一些启发性探讨，来说明第三类宏观量子态的突破是否有可能与笼目晶体有所联系。

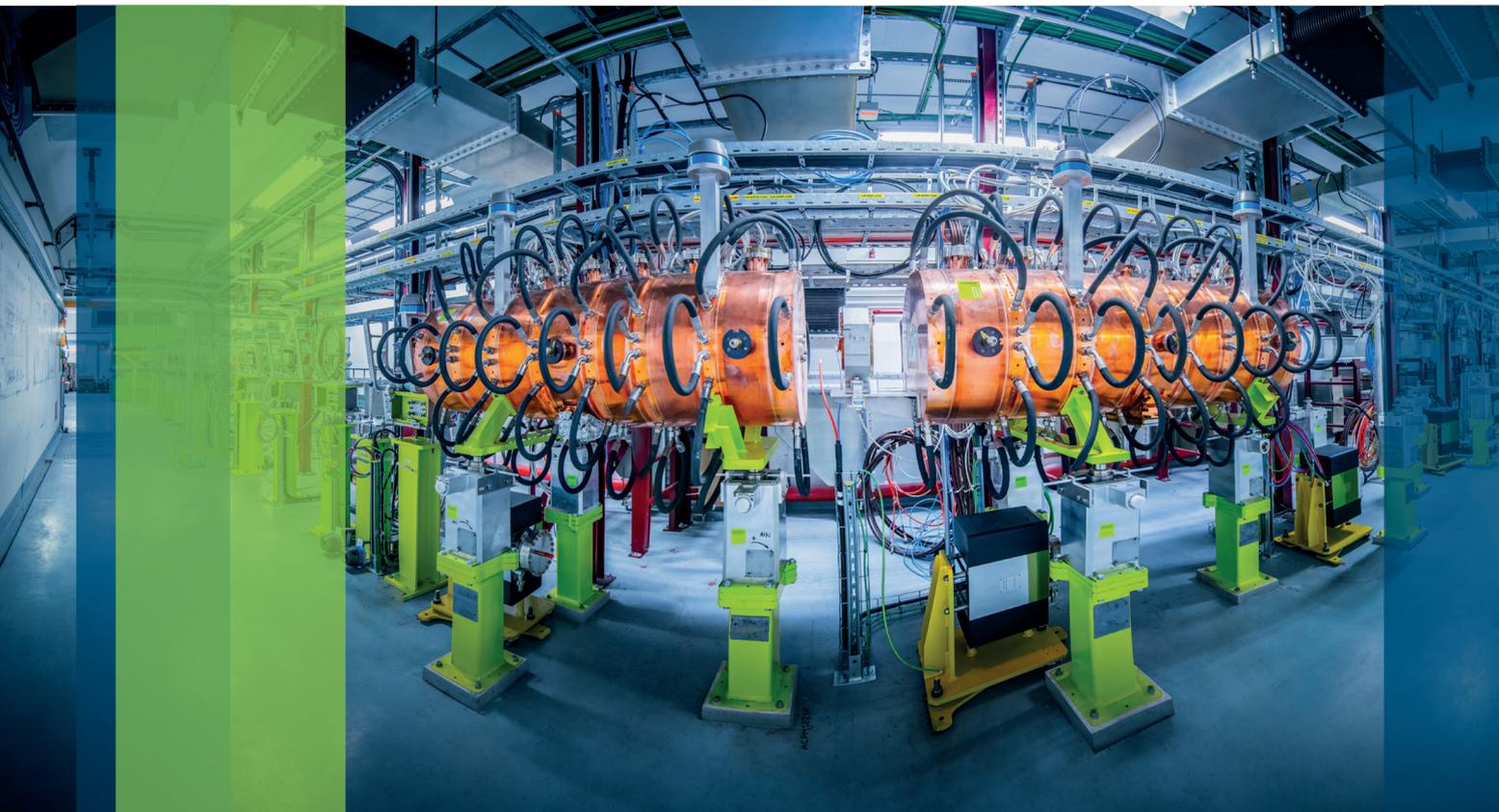
纵观前两次宏观量子态的发现，超导效应的

发现是人类低温实验技术实现突破的一个自然成果,其理论解释(电子-声子耦合造成的电子配对)需要等待二次量子化理论的发展;而量子霍尔效应是在低温实验技术、超导强磁体实验技术成熟的前提下,材料加工技术取得突破的成果,其理论解释(电子在磁场中形成朗道能级与拓扑陈数)需要等待拓扑电子理论的发展。由此,笔者大致可以作出如下三点判断。第一,第三类宏观量子态的发现可能还是起源于实验探索,而非理论预言;最近的研究经验中笼目材料里确实常有一些令人意想不到的非验证性的发现。第二,第三类宏观量子态需要至少两种量子物性的耦合产生;笼目晶体中广泛存在量子层次上几何、拓扑、自

旋和关联的交缠相互作用,有可能促成这种耦合。第三,第三类宏观量子态的发现需要借助由前两项发现建立起来的先进量子探测技术;笼目晶体的研究中,先进谱学技术起到了引领研究发展的作用,笔者推测第三类宏观量子态的发现也很有可能不是率先来自传统输运而是来自量子谱学技术。借鉴到如此多的量子现象演生在与中华民俗文化密切相关的笼目晶格中,依托于笼目晶体中在量子层次上多维度的交缠相互作用,辅助以新世纪人类大炼量子而发展的各种先进的量子探测手段,笔者衷心祝愿国内的年轻一代学者可以大胆探索,搜寻还未可知的第三类宏观量子态,迎来真正的量子盛宴。

参考文献

- [1] Yin J X, Lian B, Hasan M Z. *Nature*, 2022, 612: 647
- [2] Jiang K *et al.* *National Science Review*, 2022: nwac199
- [3] Neupert T *et al.* *Nature Physics*, 2022, 18: 137
- [4] Chen H *et al.* *Chin. Phys. B*, 2022, 31: 097405
- [5] Zhang H *et al.* *Advance Quantum Technologies*, 2021, 4: 2100073
- [6] Syôzi I. *Prog. Theor. Phys.*, 1951, 6: 306
- [7] Mielke A. *J. Phys. A*, 1991, 24: L73
- [8] Ohgushi K, Murakami S, Nagaosa N. *Phys. Rev. B*, 2000, 62: R6065
- [9] Xu G, Lian B, Zhang S C. *Phys. Rev. Lett.*, 2015, 115: 186802
- [10] Yin J X *et al.* *Nature*, 2018, 562: 91
- [11] Yang H *et al.* *New J. Phys.*, 2017, 19: 015008
- [12] Tang E, Mei J W, Wen X G. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 106: 236802
- [13] Yu S L, Li J X. *Phys. Rev. B*, 2012, 85: 144402
- [14] Wang W S, Li Z Z, Xiang Y Y *et al.* *Phys. Rev. B*, 2013, 87: 115135
- [15] Kiesel M L, Platt C, Thomale R. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110: 126405
- [16] Ko W H, Lee P A, Wen X G. *Phys. Rev. B*, 2009, 79: 214502
- [17] Kida T *et al.* *J. Phys. Condens. Matter*, 2011, 23: 112205
- [18] Nakatsuji S, Kiyohara N, Higo T. *Nature*, 2015, 527: 212
- [19] Liu E *et al.* *Nat. Phys.*, 2018, 14: 1125
- [20] Wang Q *et al.* *Nat. Commun.*, 2018, 9: 3681
- [21] Ye L *et al.* *Nature*, 2018, 555: 638
- [22] Yin J X *et al.* *Nature*, 2020, 583: 533
- [23] Tsai H *et al.* *Nature*, 2020, 580: 608
- [24] Guguchia Z *et al.* *Nat. Commun.*, 2020, 11: 559
- [25] Liu D F *et al.* *Science*, 2019, 365: 1282
- [26] Morali N *et al.* *Science*, 2019, 365: 1286
- [27] Yin J X *et al.* *Nat. Commun.*, 2020, 11: 4415
- [28] Belopolski I *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2021, 127: 256403
- [29] Liu Z H *et al.* *Nat. Commun.*, 2020, 11: 4002
- [30] Yin J X *et al.* *Nat. Commun.*, 2020, 11: 4003
- [31] Kang M *et al.* *Nat. Commun.*, 2020, 11: 4004
- [32] Lin Z *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2018, 121: 096401
- [33] Kang M *et al.* *Nat. Mater.*, 2020, 19: 163
- [34] Yin J X *et al.* *Nat. Phys.*, 2019, 15: 443
- [35] Zhang S S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2020, 125: 046401
- [36] Yin J X *et al.* *Nat. Commun.*, 2020, 11: 4003
- [37] Ortiz B R *et al.* *Phys. Rev. Mater.*, 2019, 3: 094407
- [38] Ortiz B R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2020, 125: 247002
- [39] Jiang Y X *et al.* *Nat. Mater.*, 2021, 20: 1353
- [40] Liang Z *et al.* *Phys. Rev. X*, 2021, 11: 031026
- [41] Li H *et al.* *Phys. Rev. X*, 2021, 11: 031050
- [42] Chen K Y *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2021, 126: 247001
- [43] Yu F H *et al.* *Nat. Commun.*, 2021, 12: 3645
- [44] Zheng L *et al.* *Nature*, 2022, 611: 682
- [45] Zhao H *et al.* *Nature*, 2021, 599: 216
- [46] Chen H *et al.* *Nature*, 2021, 599: 222
- [47] Yu F H *et al.* *Phys. Rev. B*, 2021, 104: L041103
- [48] Feng X, Jiang K, Wang Z *et al.* *Sci. Bull.*, 2021, 66: 1384
- [49] Mielke III C *et al.* *Nature*, 2022, 602: 245
- [50] Xu Y *et al.* *Nat. Phys.*, 2022, 18: 1470
- [51] Guo C *et al.* *Nature*, 2022, 611: 461
- [52] Teng X K *et al.* *Nature*, 2022, 609: 490
- [53] Yin J X *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2022, 129: 166401
- [54] Zhong Y *et al.* *Research square*, 2022, DOI: 10.21203/rs.3.rs-1876119/v1
- [55] Xu H S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2021, 127: 187004
- [56] Roppongi M *et al.* *Nat. Commun.*, 2023, 14: 667
- [57] Yin J X *et al.* *Nat. Commun.*, 2020, 11: 4415
- [58] Li J, Wang Y. *Europhysics Letters*, 2009, 88: 17009



粒子加速器真空系统

—安捷伦真空解决方案

- 大量的国内外项目安装案例
- 经验丰富的技术支持团队，免费为您的方案设计、计算选型等提供参考
- 大抽速离子泵，钛升华泵，分子泵，干泵，移动式分子泵机组等全系列产品
- 可根据实际需要提供穿心离子泵等定制产品



安捷伦科技（中国）有限公司真空事业部
800 820 6778（固定电话拨打）
400 820 6778（手机拨打）

下载样本或了解更多，请扫描上方二维码，
或登陆安捷伦官方网站：www.agilent.com
(点击“产品”选择“真空产品”)。