

当物理遇见拓扑

有望揭示奇异新粒子或促进量子计算发展

美国宾夕法尼亚大学理论物理学家 Charles Kane 从未想到自己会迷上拓扑学。“我并不像数学家那样思考。”Kane 承认,自己往往关注的是固体材料的实际问题。他并不孤独。物理学家通常极少关注拓扑学——从数学角度对空间中的形状及其排列进行研究。但如今,Kane 和其他物理学家正竞相涌入这个领域。

过去 10 年,他们发现,拓扑学为研究材料的物理性质提供了独特的视角,比如一些绝缘体如何沿着表面上的单原子层偷偷摸摸地导电。

如今,拓扑物理学获得真正的爆发:关于固态物理学的论文极少见到标题中没有“拓扑学”的字样。同时,实验学家变得更加忙碌。一项日前发表于《自然》杂志的研究报告了一个可能失去拓扑效应的材料图集,从而为物理学家寻找奇异状态的物质比如外尔费米子和量子自旋液体提供了更多空间。

转折中的物理学

1982 年,来自华盛顿大学的 David Thouless 和同事揭示了量子霍尔效应背后的拓扑学。这最终帮助 Thouless 共同分享了去年的诺贝尔物理学奖。和电子的自旋一样,这种拓扑学现象发生在一个抽象的空间内。不过,在这种情形下,基本形状不是莫比乌斯带,而是甜甜圈表面。随着磁场增强和减弱,旋涡在表面形成、消失,就像飓风眼附近的风场模式。

旋涡拥有一种被称为回转数的属性,即描述它们绕着中心点旋转的次数。回转数是拓扑不变量——它们不会随着形状变形而发生改变。同时,当磁场被施加到“甜甜圈”附近时,瞬间出现或消失的全部旋涡回次数总是保持恒定。这个数量以美籍华人数学家陈省身命名,被称为陈数。自上世纪 40 年代起,它便为拓扑学家所知。

然而,最令人震惊的发现尚未到来。直到本世纪头十年的中期,科学家仅在强磁场中发现了量子霍尔效应和其他拓扑效应。不过,Kane 和同事以及另一个独立的团队意识到,一些由重元素构成的绝缘体通过电子和原子核之间的内部相互作用,形成了自己的磁场。这为材料表面的电子赋予了强劲的拓扑保护的状态,从而使其在几乎没有阻力的情况下移动。2008 年,普林斯顿大学物理学家 Zahid Hasan 领导的团队在被认为是拓扑绝缘体的碲化铋晶体中展示了这种效应。“乐趣开始了。”Hasan 说。

最大的惊奇之一是这些状态通常可被用于解决不同问题的理论解释,比如将重力学和量子物理学结合起来。诸如普林斯顿高等研究院理论学家 Edward Witten 提出的随后在纯数学领域催生突破性成果的拓扑量子场理论等概念,如今重返物理学中意想不到的地方。

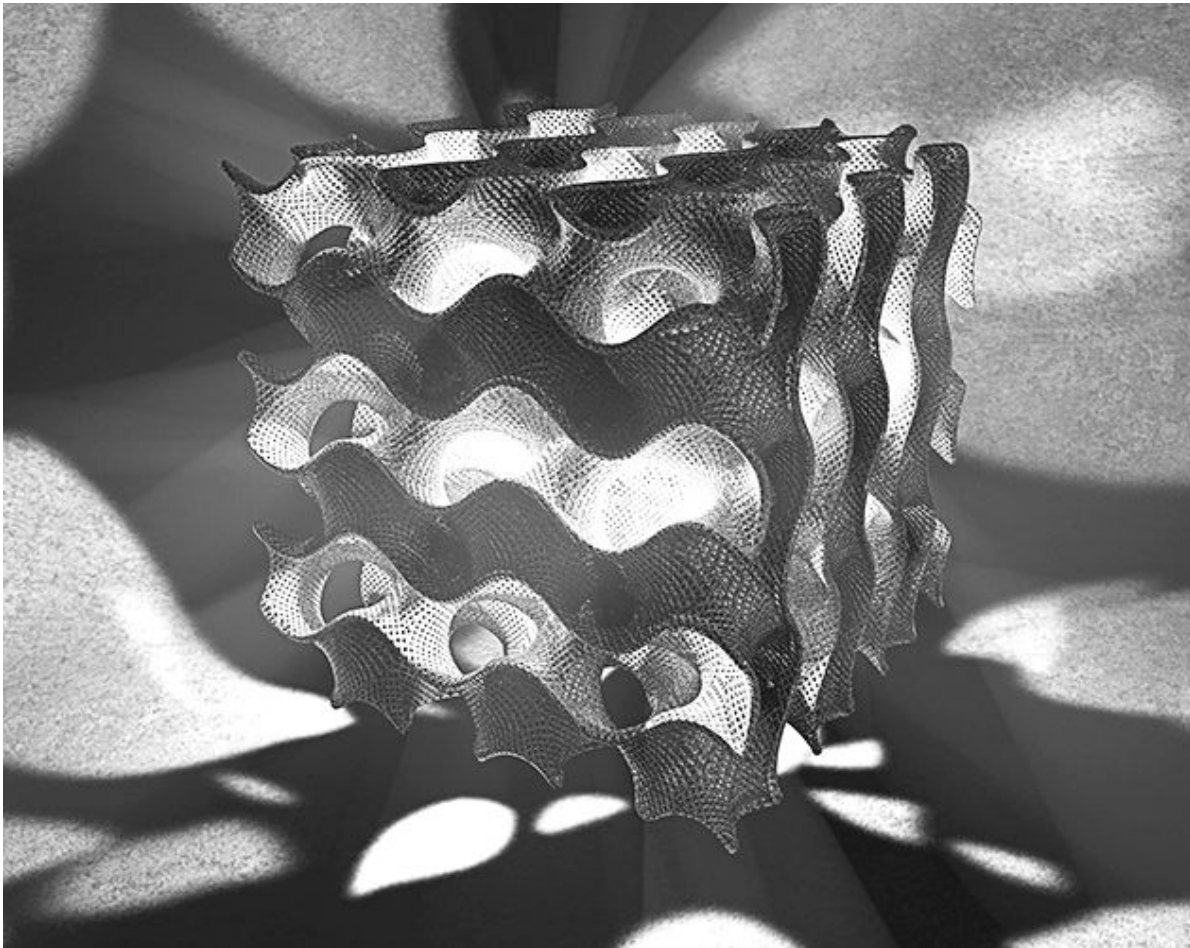
陆续被发现的准粒子

另一个重要的兴奋源头是在拓扑材料中,电子和其他粒子有时会形成这样一种状态,即

“关于固态物理学的论文极少见到标题中没有‘拓扑学’的字样。”

螺旋二十四面体结构

图片来源: NIKSPENCER/Nature



它们共同表现出仿佛是一种基本粒子。这些准粒子状态可能拥有在任何已知基本粒子中都不存在的属性。它们甚至能模拟物理学家尚未发现的粒子。

一些最受瞩目的准粒子在两年前被发现。它们被称为外尔费米子,或者没有质量的费米子,由数学家赫尔曼·外尔在上世纪 20 年代推测出来。在传统粒子堆中发现的所有费米子都拥有一定的质量。不过,据 Hasan 推算,碲化铋晶体内的拓扑效应应当会产生没有质量且表现得像外尔费米子一样的准粒子。对于准粒子来说,没有质量意味着无论其能量大小,总是以相同的速度移动。2015 年,Hasan 团队通过实验证实了这一点,由中国科学院研究人员翁红明带领的团队也作出了上述发现。科学家希望,这些材料或许有一天能被用于诸如超高速晶体管等应用。穿过晶体的电子在撞击到杂质时通常会散开,而这减缓了它们前进的速度。但 Hasan 发现的碲化铋晶体中的拓扑效应能使电子畅通无阻地穿过。

与此同时,麻省理工学院物理学家 Marin Soljacic 和同事观察到一些和外尔费米子非常相似的东西,但这是在电磁波而非固态晶体中发现的。首先,他们通过小心翼翼地在塑料板上钻孔,构建了一个螺旋二十四面体结构——看上去像环环相扣的螺旋梯系统的 3D 模型。随后,研究人员向这个螺旋二十四面体结构发

射微波,并且发现光子(没有质量的玻色子)表现得像出现在碲化铋晶体中的外尔费米子。对于蓬勃发展的拓扑光子学领域来说,最令人激动的前景之一是利用晶体创造使光仅在一个方向传播的光学纤维。这将阻止光线从有缺陷的地方弹回,并且极大地提高长距离传输的效率。

从怪诞性的尺度来说,居于 Soljacic 发现的玻色子—费米子之上的唯一准粒子可能是被称为任意子的奇怪物质。通常情况下,单个粒子要么是费米子,要么是玻色子。但在原子层厚度的二维材料中出现的准粒子——任意子打破了这一规则。当两个相同的粒子交换地方时,研究人员能观察到这种打破规则的现象。在玻色子中,交换地方对集体的波函数没有任何影响。对于费米子来说,它会将波函数的相位改变 180 度,类似于单个电子反转 360 度时发生的情形。不过,对于任意子来说,波函数的相位改变多少度取决于任意子的类型。更重要的是,理论表明,在某些情形下,再次将任意子交换到原来的地方并不能恢复初始的波函数。

寻找更多新材料

按照惯例,寻找新拓扑绝缘体的实验学家依赖于一个辛苦费力的过程,其中涉及计算

每种材料中的电子可能拥有的能量来预测它的属性。

如今,由普林斯顿大学理论物理学家 Andrei Bernevig 领导的团队发现了一条捷径。研究人员分析了可能在一种材料的晶体结构中存在的 230 种不同的对称性,并由此创建了一个拓扑物质图集。随后,他们系统地预测了哪些对称性原则上会容纳拓扑状态。这避免了首先计算所有能级的麻烦。他们认为,在所有材料中,有 10%~30%能表现出拓扑效应——可能共计上万吨化合物。迄今为止,这些拓扑材料中仅有几百种得以确认。“事实证明,我们迄今了解的只是可能存在的众多拓扑材料的一小部分,还有更多我们不知道的材料。”Bernevig 表示。

该团队包括 3 名来自西班牙毕尔巴鄂市巴斯克大学的晶体数学专家。研究人员很快将利用毕尔巴鄂晶体服务器,弄清楚某种特定的晶体材料是否可能具有拓扑结构。清华大学物理学家 Wei Li 表示,Bernevig 的方法“肯定是一种寻找新的拓扑绝缘体的更高效方式”。“我认为将有很多新材料出现。”

“不过,知道某种材料拥有一些拓扑状态的物质并不意味着能立即预测它的属性。”德国马普学会固体化学物理所材料科学家 Claudia Felser 提醒说,这些属性仍需通过针对每种物质进行的计算和测量得出。(宗华编译)

灭此貂护彼貂

人工放归或有助恢复欧洲貂种群

沿着阿拉贡河上游,在比利牛斯山锯齿状的山峰和一座水坝之间,保护生物学家 Madis Põdra 和同事计划在不久后把 10~12 只被捕获的欧洲貂释放到这里的欧洲貂理想栖息地:一个有 150 公里水道的西班牙原始荒地。

Põdra 希望它们能形成新的种群,使极度濒危的欧洲貂渡过难关。目前,西班牙的欧洲貂不足 500 只。

但人们要保护这些有深棕色皮毛的动物,就需要杀死它们的主要竞争对手——同样可爱的美洲貂。10 年前,科学家也曾试图将人工繁育的欧洲貂释放到野外,但由于未能连根拔除美洲貂种群而最终失败。这次 Põdra 团队利用精心制作的浮扣陷阱捕捉了美洲貂。

在欧洲其他地方,科学家也将欧洲貂再次引入此类生态安全的地区。“欧洲貂仍将是一个受管理物种,因为它们目前似乎无法完全摆脱美洲貂。”供职于西班牙欧洲貂联盟的 Põdra 说。

1 个世纪前,欧洲貂广泛分布于欧洲,沿着河流和溪流生活,以田鼠、两栖动物、小龙虾和鱼类为食。但现在只有数千只欧洲貂分布在法国、西班牙和多瑙河三角洲。而在俄罗斯,人们已经见不到欧洲貂的身影了,大多数科学家认为这种动物在那里已经濒临消失。

栖息地消失和捕猎也是导致欧洲貂种群数量下降的原因,但美洲貂是其最大威胁因素。作为欧洲貂的远亲,美洲貂与其极为类似,只是没有前者标志性的白鼻子。上世纪 20 年代,皮毛商人因美洲貂的优质皮毛而将其引入欧洲,但这种动物逃出了牢笼,并在野外繁荣发展。由于更大、更具适应性和攻击性,这些美洲貂很快便“挤走”了本土物种。它们还带来了新的疾病,但科学家不认为这些疾病是欧洲貂锐减的原因。



科学家将人工繁育的欧洲貂放归自然。

图片来源: Tiit Maran

在人们第一次试图将人工养殖的欧洲貂放归自然前,2000 年,在一个面积约 100 平方公里的爱沙尼亚希乌马岛上,猎人和捕兽器杀死了这里的全部美洲貂,它们是早已倒闭的皮毛厂的“遗产”。

即便如此,爱沙尼亚塔林动物园园长 Tiit Maran 回忆道,让该动物园繁育的欧洲貂在这里生存仍很困难。“它们走到离河流太远的地方,不知道在哪里生活。”但团队发现,如果雌貂在河流附近产崽,那些幼崽就能知道家

在哪里。

现在,希乌马岛上至少有 100 只欧洲貂。Maran 团队希望在附近的萨拉马岛进行类似工作。萨拉马岛比希乌马岛大 3 倍,是另一个欧洲貂天堂。

而另一个避难所是德国。2010 年,研究人员在施泰因胡德湖附近释放了欧洲貂。负责该项目的施泰因胡德湖生态保护站的 Eva Lüers 和 Thomas Brandt 表示,目前,欧洲貂种群趋于平稳。2015 年,相机拍下了首张欧洲貂幼崽照片。

科学线人

全球科技政策新闻与解析

美加州推进气候研究计划



气候变化曾加重加州干旱。

图片来源: Diane Cook/Len Jenschel/NGC

美国加州一直有单打独斗保护环境的历史。现在,总统唐纳德·特朗普虽然不再支持气候科学和政策,但加州科学家仍在为建立本土气候研究机构绘制蓝图。

该项目由加州一流公立大学支持,已经进入开始阶段。如果成功,它将成为美国近年来在气候研究领域投入最大的项目。这个“加州气候科学和解决方案研究所”将资助气候变化基础和应用研究,旨在帮助该州应对全球气候变暖问题。

据悉,该项目每年可获得上亿美元的资金,资金的来源可能是加州碳总量管制与排放交易计划的收入,不过是否会获得州长支持还不清楚。

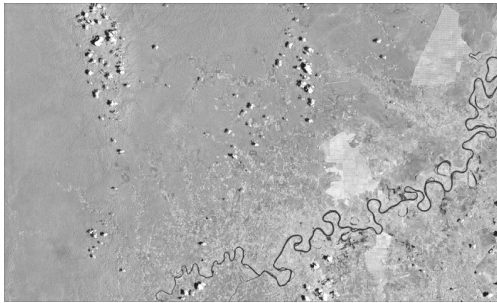
倡议者表示,他们受到了加州州长 Jerry Brown 的热情接待,但 Brown 的一个发言人却只表示“讨论正在进行”。而且,相关计划还必须获得该州立法机关通过。

“目的是开发我们需要的研究,然后将气候解决方案落到实处。”加州大学伯克利分校能源专家 Daniel Kammen 说。他指出,尽管该研究所将着重服务于加州当地的需求,但 Brown 等州官员也意识到他们的工作具有国际影响,尤其是在目前特朗普要求美国退出《巴黎气候协定》的背景下。“这正迎合了我们常用的一个词:‘自下而上’。”Kammen 说。

而且,加州可能最终会迎来一些同伴。纽约哥伦比亚大学科学系主任 Peter de Menocal 希望能建立一个大学和慈善组织联盟,以支持应对气候变化影响的研究。相关议题可能包括局部海平面上升和淡水资源及食物的可用性变化等。

实际上,这已经不是加州首次支持不受华盛顿欢迎的科学领域。2004 年,该州选民同意划拨 30 亿美元建立加州再生医学研究所,而当时的总统乔治·布什宣布限制联邦政府支持人类胚胎干细胞研究。到目前为止,该中心已资助了超过 750 个项目。(张章)

亚马逊地区发展严重影响土著部落



2016 年地球资源卫星拍摄了秘鲁亚马逊雨林砍伐情况。

图片来源: USGS/Landsat

近日,一项亚马逊原始部落调查研究发现,亚马逊盆地的开发项目,例如水坝、道路以及石油天然气开采等,正在不断蚕食数以千计原住民赖以躲避外界干扰的森林。

巴西国家印第安基金会(FUNAI)前成员 Antenor Vaz 梳理了确认或报告南美洲 7 国——玻利维亚、巴西、哥伦比亚、厄瓜多尔、巴拉圭、秘鲁和委内瑞拉孤立部落位置的地图记录。然后,他将这些地图与石油天然气及矿产开采、森林砍伐和水电站大坝的位置图进行了比较。

结果显示,尽管大部分部落位于国家公园或为其划定的保护区内,但这些部落仍日益被大型项目所包围。Vaz 在近日举行的南美洲低地人类学会议上发布了这些结果。

Vaz 表示这些地图可能为人们敲响了警钟。“这些开发项目对土著居民可能是最大的威胁因子。”他说。这些土著保持着传统的生活习惯,对一般疾病缺乏免疫力,因此与外来者接触会对他们有危险。

但该地图集不包含道路。这也是一个重要威胁,因为它会催化伐木、森林开垦,并进一步导致森林碎片化。例如,在秘鲁东南部,非法策路正逐渐向 Mashco Piro 人的一个部落延伸。

此外,在巴西,持续的政治动荡将加重土著部落的脆弱性。今年 1 月,该国政府将划定原住民领土边界的责任从 FUNAI 转移到司法部。支持者表示这将让工作流程更流畅,但批评者认为这将削弱人类学家等专家在决策过程中的作用。

不过,巴西土著权利倡导者也赢得了一场战斗。巴西最高法院近日做出裁决,支持两个部落对一项可能缩小原住民领土权利的措施提出异议。根据该措施,那些无法证明其在 1988 年 10 月占用的祖传土地的所有权,将失去对这些土地的主权。如果法院支持该措施,会导致一些目前受保护的地区用于农业、牧场和伐木业。但这场官司还未结束,法院延迟了对第三个部落相关案件的裁决。(张章)

尽管欧洲貂的境况尚未如此惨淡,而且人们未曾对这些动物使用过人工授精,但 Põdra 认为这是个好主意。(唐一尘编译)