

2016年凝聚态物理学热点回眸

谷林^{1,2}, 刘效治^{1,2}, 张庆华¹

1. 中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190
2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为盘点2016年凝聚态物理学领域的进展,以电子负折射现象的发现、氦III的新相中观察到半量子涡旋、实现功能氧化物界面处的自旋电荷转化、发现马约拉纳费米子存在的关键证据、在声学拓扑绝缘体实现声子的量子自旋霍尔效应等成果比例,简述了低维量子体系、关联体系、拓扑体系、带隙调控及量子计算等方向的进展。

关键词 拓扑绝缘体;功能氧化物界面;半量子涡旋;马约拉纳费米子

2016年诺贝尔物理学奖授予 David J. Thouless, F. Duncan M. Haldane 和 John M. Kosterlitz 3位科学家,以表彰他们发现了物质拓扑相以及在拓扑相变方面作出的理论贡献,这极大地鼓舞了凝聚态物理学家的研究热情。拓扑概念的引入不仅引发人们重新审视过去的物理现象和概念,也激励科学家在探索新现象、发掘新物质和证实多种物理规律或机制的道路上奋勇前进。

凝聚态物理学的主要研究对象是由粒子(如原子、离子、分子等)构成并在某种程度上呈现汇聚形式的物质。构成凝聚体的粒子种类可以多样,每个粒子的内禀属性和空间运动具有多个自由度,而凝聚的形式又可以在外场(外界环境)的作用下呈现多种变化,展现出丰富、复杂又迷人的物理现象,因而凝聚态物理学的研究成为当代物理学领域最庞大的分支之一。有别于其他物理学分支的是,凝聚态物理涉及到的空间尺度没有天体物理那么大,而能量尺度也不会如高能物理那么高;通俗地来讲,大多数呈现凝聚态的物质都是生活中常见或常用的,并与当代生物技术、信息技术的革新息息相关。

2016年对凝聚态物理学领域来说是一个充满喜悦的丰收年。本文列举5个具有代表性的科研工作,概要地介绍和展示凝聚态物理学领域在2016年中获得的重要发现和成果。重点选取了低维量子体系、关联体系、拓扑体系、带隙调控及量子计算这5个领域。低维量子体系方面介绍了石墨烯PN结处的电子负折射现象。关联体系方面介绍了功能氧化物界面处的电荷自旋的相互转化。拓扑体系方面介绍了以半量子涡旋为代表的拓扑缺陷和以声子晶体的演化为代表的拓扑相变。带隙调控方面介绍了声子晶体中的能带反转。量子计算方面介绍了马约拉纳费米子的发现和证实。

1 研究热点

1.1 电子负折射现象的发现

俄国物理学家 Victor Veselago 在1968年理论上预言了光线的负折射^[1], 21世纪初多国科学家在实验上终于证实了光学中的负折射现象^[2-3],并在接下来的几年中从二维阵列扩展到三维材料^[4],从微波频段扩展到可见光范围^[5]。随后,光学负折射现象被广泛应

用在如可以弯曲光线的隐形斗篷^[6]和突破衍射极限的超透镜^[7]的制备中。

对于固体中的载流子(电子和空穴),可以用费米波矢来描述它的运动行为。当电子在N型半导体中,费米波矢与其运动方向一致;而在P型半导体中,载流子换为空穴,费米波矢也随之反向。如同光线在两个具有一正一负折射率的介质界面处会发生负折射现象一样,电子在任意一种半导体的PN结处也应该发生负折射现象;并且原则上由于不需要像光学中专门构造具有负折射率的物质或结构,电子的负折射现象应该更容易产生。但是相比之下,电子负折射现象的实验发现却推迟了十余年。

其原因,一方面是由于电子在一般的半导体中会与结构中的缺陷、杂质和晶格振动发生散射而偏离原先的运动轨迹,使得传播方式和光线的直线传播行为相差甚远;另一方面传统的半导体在导带和禁带之间具有一定宽度的能隙,电子只有获得或损失一部分能量才能跨越PN结从一端到达另一端,因此绝大部分的电子仅仅是被散射或反射,而无法透射到另一端并产生可观的

收稿日期:2016-12-25;修回日期:2017-01-03

基金项目:国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(51522212);中央组织部“青年拔尖人才支持计划”

作者简介:谷林,研究员,研究方向为原位电镜原子尺度表征,电子信箱:lgu@aphy.iphy.ac.cn;刘效治(共同第一作者),博士研究生,研究方向为透射电镜显微学,电子信箱:liuxz@iphy.ac.cn

引用格式:谷林,刘效治,张庆华. 2016年凝聚态物理学热点回眸[J]. 科技导报, 2017, 35(1): 10-15; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2017.01.001

折射或负折射现象。

自2007年人们将目光转移到石墨烯上^[8],寄希望于石墨烯的PN结处可以实现电子的负折射现象(图1^[9])。高质量的单晶石墨烯具有极高的电子迁移率,在室温下就可以允许电子传播数微米的距离,而不存在由于结构缺陷或杂质导致的任何碰撞或散射。同时,单原子层的石墨烯作为一种零带隙的二维材料,其PN结对于电子来说变得相当透明,大多数电子都可以无能量改变地透射过去。

然而,想在石墨烯中观察到电子负折射现象并没有那么简单。传统的光刻工艺会不可避免地在石墨烯PN结界面处产生原子尺度的起伏,这微弱的起伏对于电子的传输却是致命的;就如同光线照射到毛玻璃上被漫散射一样,大多数的电子也会在不平整的界面处发生散射而无法透射过去,也就没办法产生可观的折射或负折射现象。2016年,哥伦比亚大学的Cory Dean等^[10]利用石墨烯自身的边缘作为原子级平整的边界,克服了界面散射的问题,成功地观察到电子的负折射现象。不仅电子负折射技术和石墨烯PN结存在众多潜在的应用,而其中制备原子级平整的界面技术也对未来的器件制造提供了启发性的借鉴意义。该成果发表在2016年9月30日《Science》杂志上^[10],并被欧洲物理学会新闻网站Physics World评选为“2016年度国际物理学领域的十项重大突破”之一。

1.2 在氦III的新相中观察到半量子涡旋

超流体具有超流动性,指的是组成超流体的粒子集体表现出液态行为,同时内部不具有任何粘滞阻力。构成超流体的粒子一般为可以形成玻色爱因斯坦凝聚的玻色子。20世纪30年代末,苏联科学家Pyotr Leonidovich Kapitza首先观察到液态氦IV的超流体特性,并因此获得1978年度诺贝尔物理学奖。这一现象很快被苏联科学家Lev Davidovich Landau用凝聚态理论解释。而超流动性这一概念也延伸到天体物理、高能物理及量子引力的理论

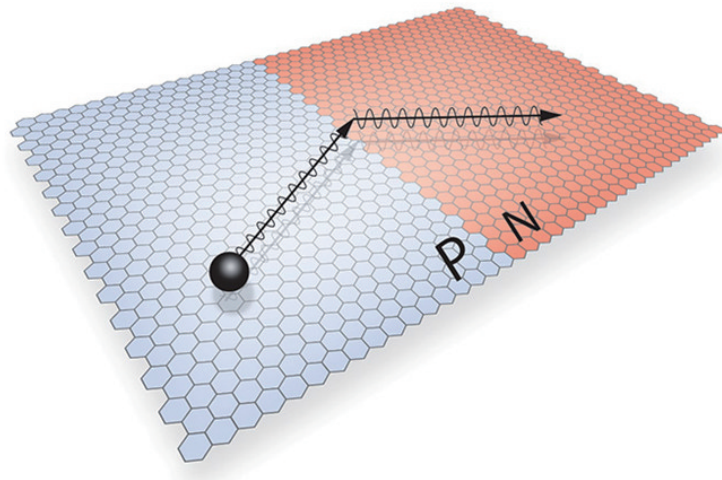


图1 电子在石墨烯PN结处的负折射现象的示意

研究中。20世纪70年代,科学家在氦III中也发现了超流动特性,原本具有费米子特性的氦III原子两两形成了库珀对,而库珀对是一种玻色子,因此可以发生玻色爱因斯坦凝聚并形成超流体。

超流体中的量子涡旋指的是超流体围绕一个点状的孔流动构成的涡旋结构。沿着涡旋路径对速度矢量积分后可以发现,涡旋度即环路的线积分值是分立不连续的整数,因此称作量子涡旋。涡旋度的最小单位是 $h/2m$,其中 h 是普朗克常数, m 是超流粒子的质量。如图2所示^[11],左侧为单量子涡旋,它的环形通量值等于 $h/2m$,相当于量子相 θ 发生了 2π 的变化,而自旋方向相关的相角 α 却没有变化;右侧为半量子涡旋,它的环形通量值等于 $h/4m$,量子相 θ 和自旋方向相关的相角 α 都发生

了 π 的变化,使得总体相角的变化也是 2π 。

单量子涡旋于20世纪60年代在氦IV和氦III中相继被发现。1985年理论物理学家预言氦III中可以观察到半量子涡旋^[12]。因为半量子涡旋并不会在一般的体系中出现,只有当构成这个体系的粒子是由基本粒子配对而成的时候,这个体系中才会出现半量子涡旋。氦III超流相时其构成粒子是库珀对,而库珀对是由更基本的粒子即氦III原子构成的,因此有希望在氦III中观察到半量子涡旋。

科学家在多种电子结构与氦III类似的体系中观察到半量子涡旋,如玻色爱因斯坦凝聚体^[13]和自旋三重态的超导体^[14]。但是由于强烈的自旋轨道相互作用,众多希望在氦III中观测到半量

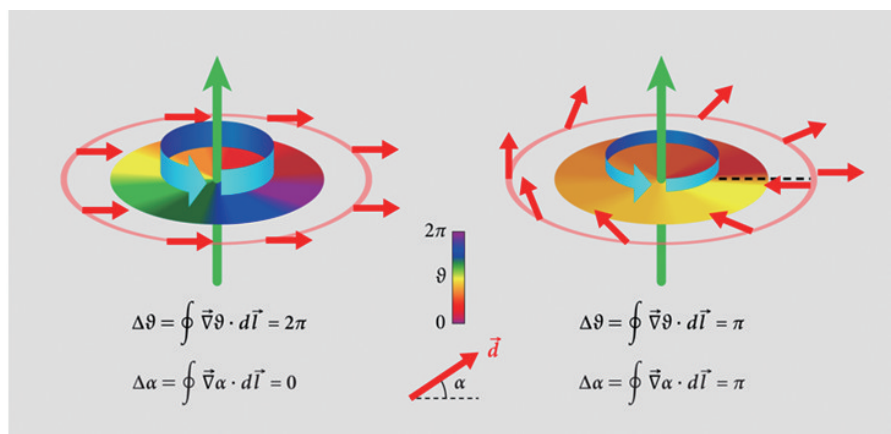


图2 单量子涡旋(左)与半量子涡旋(右)示意

子涡旋的实验都失败了。2016年12月,芬兰阿尔托大学和俄罗斯卡皮查研究院的物理学家成功地在氦 III 的新相中观察到了半量子涡旋^[15]。这次实验发现,既是对40年来关于超流氦 III 的理论发展和精致实验控制的确凿展现,也为未来众多量子物质拓扑相量子态的操控提供了独特平台。Samuli Autti 预言,这个发现为探索半量子涡旋的中心提供了途径,未来有希望在氦 III 半量子涡旋中心发现独立的马约拉纳费米子。该成果发表在2016年12月14日《Physical Review Letters》杂志上^[15],并被选为当期亮点文章由美国物理学会新闻网站 Physics 全文报道。

1.3 实现功能氧化物界面处的自旋电荷转化

自旋电子学的概念是20世纪80年代诞生的,人们认为信息可以通过自旋这一新的自由度来存储、传递和处理,引起了极大的研究热潮。更加让科学家兴奋的是,自旋不仅可以通过磁场来调控,电场也可以有效地实施调控。所有通向自旋电子学的路径中,最引人注目的是自旋霍尔效应。自旋轨道的相互作用使得电子的运动与自旋关联起来,当电流(电荷)流过样品时,发生自旋极化,在横截面上产生与其方向垂直的自旋电流,即不同自旋方向的电子朝着相反的方向运动(图3(a)),这是一种典型的电荷向自旋的转化。相反,也可以向材料注入自旋电流,产生与之方向垂直的电荷电流,而这是一种自旋向电荷的转化,被称作逆自旋霍尔效应(图3(b))。

然而自旋霍尔效应的电荷自旋转化效率与逆自旋霍尔效应的自旋电荷转化效率一直都在10%以下,限制了它的实际应用。Edouard Lesne 等^[17]利用 LaAlO₃/SrTiO₃ 异质结界面处的低维效应,获得了前所未有的自旋向电荷的高转化效率。

氧化物界面(如 LaAlO₃/SrTiO₃)由于其奇特特性,吸引了众多的理论和实验研究,成为氧化物界面材料中最经典的实验对象之一。虽然 LaAlO₃ 和 SrTiO₃ 都是宽禁带的绝缘体,但是当

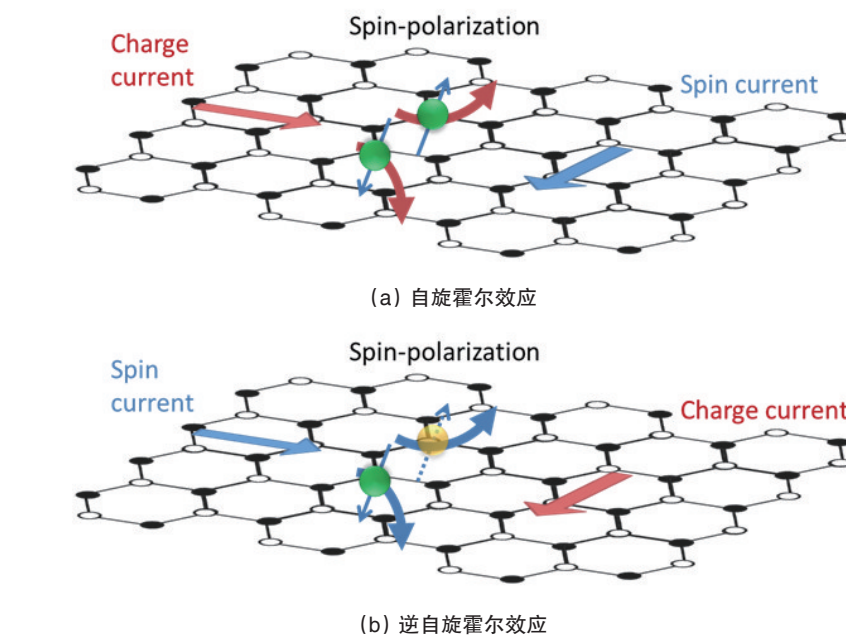


图3 自旋霍尔效应与逆自旋霍尔效应

LaAlO₃ 的厚度超过阈值后会在 SrTiO₃ 的界面端诱导出二维电子气,通过适当的偏压调制,可以调控界面处二维电子气中电荷的密度和迁移率。尤其有趣的是,当电荷密度超过一定阈值后,界面处显现出超导特性,而超导的转变温度同样可以通过适当的偏压来调控。

Edouard Lesne 等通过铁磁坡莫合金 FeNi 层向 LaAlO₃/SrTiO₃ 界面注入自旋电流,发生自旋向电荷的转化,并通过样品两端产生的电压探测到了电荷的积累。虽然之前在 Ag/Bi(111) 的界面处也观察到了自旋轨道相互作用引起自旋电荷转化,但是这次的转化效率高出了一个数量级。

除了电荷与自旋的互转化以外, LaAlO₃/SrTiO₃ 界面更由于其存在超导和磁性共存的现象引发了广泛而深入的探讨,再加上人们对于其界面处二维电子气形成的物理机制尚存争议, LaAlO₃/SrTiO₃ 异质结依旧会是今后研究的热点。甚至人们希望未来可以在该异质结的界面处探索和发现一系列准粒子如马约拉纳费米子的独特性质^[18]。该成果发表在2016年8月29日《Nature Materials》杂志上^[17]。

1.4 马约拉纳费米子存在的关键证据 根据相对性量子场论的自旋统计

定理,自旋为半整数的粒子(包括基本粒子、复合粒子和准粒子)都可以称为费米子。理论而言,宇宙中有三种费米子:不带质量的外尔费米子(Weyl fermion)、带质量的狄拉克费米子(Dirac fermion)、粒子与反粒子相同的马约拉纳费米子(Majorana fermion)。此外,相比于真实宇宙,固体材料中不具有洛伦兹不变量、时空结构不连续、遵守空间群而非庞加莱群,因此有希望发现新的费米准粒子。绝大多数已知的费米子都属于狄拉克费米子,如在粒子物理领域,标准模型中所有的费米子(属于基本粒子)。除了尚未研究清楚的中微子有可能是马约拉纳费米子以外,其他都是狄拉克费米子。

狄拉克费米子可以用1928年由英国物理学家 Paul Dirac 推导的狄拉克方程描述。当狄拉克费米子无质量时,可看作是两个具有不同“手性”(左旋和右旋)或是带相反拓扑“电荷”的外尔费米子的组合。如果对称性被破坏,这两个带有不同手性的外尔费米子就有可能在实空间或倒空间中分开。1929年, Hermann Weyl 将狄拉克方程简化,用以描述外尔费米子,成为著名的外尔方程。2015年,普林斯顿大学的 Hasan、麻省理工大学的 Marin Soljacic 及中国科学院物理研究所的方

忠、戴希和丁洪团队因关于外尔费米子发现的先驱性工作,入选欧洲物理学会新闻网站 Physics World 评选的“2015 年度国际物理学领域的十项重大突破”。外尔费米子的发现对室温低能耗电子学器件的应用具有重要价值。

1937 年意大利物理学家 Ettore Majorana 在狄拉克方程的基础上推导出可以描述电中性且自旋为 1/2 的粒子的马约拉纳方程,而这种粒子也被命名为马约拉纳费米子^[19]。拓扑超导体中的马约拉纳费米子(属于一种准粒子)遵循非阿贝尔统计,这是一种区别于玻色统计和费米统计的新量子统计,并且由于呈现电中性而不容易受到外界电磁干扰的特性,在未来高稳定性的量子计算中具有重要的应用价值。此外,马约拉纳费米子还可以被用于产生许多新奇的物理现象,如分数化非局域关联和隐形传态。粒子物理、凝聚态物理以及量子物理领域都对马约拉纳费米子抱有极大的兴趣和探寻热情,然而一直以来并没有关于马约拉纳费米子存在的明确实验证据。

2008 年傅亮和 Charles Kane 预言拓扑绝缘体和 s 波超导体的界面处会出现马约拉纳费米子^[20]。随后几年中,荷兰代尔夫特理工大学、瑞典隆德大学及美国普渡大学各自独立地在 3 个实验中“隐约”发现了马约拉纳费米子的迹象^[21-23]。2014 年,普林斯顿大学利用低温扫描隧道显微镜成功在超导铅元素板表面的一条铁元素长链的两端观察到类似马约拉纳束缚态的图像^[24]。然而马约拉纳费米子的磁性非常弱,要探测到它需要有更加灵敏、更低温度的扫描隧道显微镜,由于受到当时扫描隧道显微镜能量分辨率的限制,涡旋中心准粒子的最低能量和零态模无法被有效区分,因而也就无法提供马约拉纳费米子存在的明确证据。

2016 年,橡树岭国家实验室和东京工业大学分别独立地通过在模型计算中引入马约拉纳费米子成功地在 α 相的类石墨烯二维 RuCl_3 中观察到了与 Kitaev 模型相符的量子自旋液体,间接证实了马约拉纳费米子的存在^[25-26]。

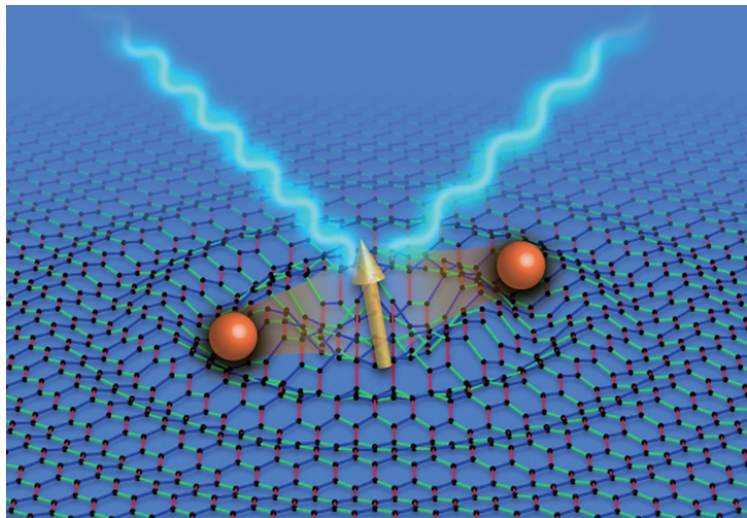


图4 马约拉纳费米子一种产生方式的示意

如图4所示,描述了在光子和电子自旋的相互作用下产生2个马约拉纳费米子的过程^[27]。2016年,上海交通大学贾金锋研究组、浙江大学许祝安和张富春研究组、南京大学李绍春研究组及美国麻省理工学院傅亮研究组等合作,率先观测到了在拓扑超导体涡旋中存在马约拉纳费米子的重要证据。通过最新搭建的 40 mK 自旋极化扫描隧道显微镜在涡旋中心进行测量,不仅确切地观察到了马约拉纳费米子的零能态,并且探测到了其自旋特性和分布特征^[28]。这次发现既为马约拉纳费米子的存在提供了明确的证据,也为对其进一步地操控提供了更加直接有效的方法。该成果发表在 2016 年 6 月 21 日《Physical Review Letters》杂志上^[28],并被科学普及网站 The Science Explorer 报道。

对于幽灵般的马约拉纳费米子的寻找一直是当代凝聚态物理学研究的主题之一,人们期望在如异质结界面、涡旋中心等结构中探测到它的踪迹。凭借探测技术的提升,终于在 2016 年获得了马约拉纳费米子更加直接和明确的证据。值得一提的是,在长期的不懈努力和精诚合作下,中国科学家在其中做出了杰出的贡献,反映出中国近年在仪器建设方面取得了长足的进展。

1.5 在声学拓扑绝缘体实现声子的量子自旋霍尔效应

拓扑绝缘体是一类具有非平庸拓扑序的材料,它的内部是绝缘的但表面

却存在导电态。虽然普通的绝缘体也可以在表面形成导电层,但是拓扑绝缘体的表面态是被对称性保护的,这是不同于普通绝缘体的关键地方。电学意义下拓扑绝缘体的研究范式已经逐渐转变到光学、声学甚至是力学,不仅提供了丰富的新物理内容,也为未来应用开拓了广泛的方向。

电学中的拓扑绝缘体具有独特的输运性质,使其在自旋电子学、热电和量子计算领域具有众多潜在的应用价值。最近几年来,玻色子(如光子和声子)的拓扑态也引起了人们的极大关注。例如对于光子,人们相继提出了光量子霍尔效应、光自旋量子霍尔效应和光拓扑绝缘体等。而对于在空气中传播的声子而言,一方面由于它是偏振为 0 的纵波,无法像光拓扑绝缘体那样利用其偏振特性构造一对满足时间反演对称的态^[29],另一方面它对外加电、磁场不响应,无法使用常规方法实现有效的调控^[30],因此要想实现空气声的拓扑态的设计极为困难。

2016 年,南京大学陈延峰、卢明辉和刘晓平等的研究首次在声子晶体上实现了声学拓扑绝缘体。如图 5 所示^[31]:上图为受拓扑保护的声波波导的结构模型,由两种不同原子半径与晶格常数比值的声学拓扑绝缘体构成的同质结,这种独特的设计可以实现单通路的声波传输,即使路径中存在空位以及局域的晶格无序和弯曲也不会损失信

号强度。图5下部为形成声学拓扑绝缘体的能带变化示意,随着原子半径与晶格常数比值的降低,原先狄拉克双锥附近的能隙会先闭合形成四重简并的过渡态,经过能带反转后再形成新的两重简并的导带和价带,至此完成了从普通声子晶体向拓扑声子晶体的拓扑相变过程。

此外,他们还巧妙地构造了一种X型的分路器模型^[32],使得赝自旋向上和赝自旋向下的声波具有完全不同的入口和出口通道,因而在空间上分离出向上和向下的两类声子。这一结构首次实现了在不需要激发和制备出单一声赝自旋的情况下,验证并实现了声子的量子自旋霍尔效应。这项发现不仅为声学拓扑现象的研究提供了新路径,同时也有望应用于未来的噪声消除技术。该成果发表在2016年8月29日《Nature Physics》杂志上^[31]。

2 结论

凝聚态物理学在2016年取得了丰富的研究成果,为人类知识宝库留下丰

厚的财富。而除本文所述的5个热点外,其他领域如冷原子、软物质、极端条件、超导、能源材料等方面均有着激动人心的发现和进展,这些研究成果既加深了人类对于物质世界的认识,也为未来应用的萌发和技术的进步创造了条

件。值得指出的是,凝聚态物理学领域仍然存在许多亟待理解和解决的物理问题,期待新的一年中凝聚态物理学家创造出更加丰硕的成果,为世界增添色彩。

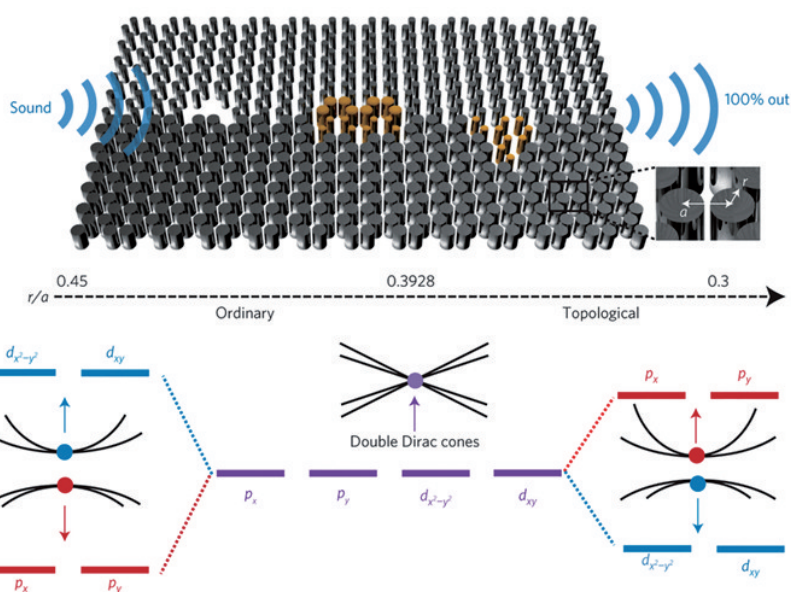


图5 受拓扑保护的声波波导的结构模型

参考文献 (References)

- [1] Veselago V G. Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of sigma and mu[J]. Soviet Physics Uspekhi-Ussr, 1968, 10(4): 509-514.
- [2] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. Science, 2001, 292(292): 77-79.
- [3] Cubukcu E, Aydin K, Ozbay E, et al. Negative refraction by photonic crystals[J]. Nature, 2003, 423(6940): 604-605.
- [4] Luo C, Johnson S G, Joannopoulos J D. All-angle negative refraction in a three-dimensionally periodic photonic crystal[J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(13): 2352-2354.
- [5] Lezec H J, Dionne J A, Atwater H A. Negative refraction at visible frequencies[J]. Science, 2007, 316(5823): 430-432.
- [6] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. Science, 2006, 314(5801): 977-980.
- [7] Grbic A, Eleftheriades G V. Overcoming the diffraction limit with a planar left-handed transmission-line lens[J]. Physical review letters, 2004, 92(11): 117403.
- [8] Cheianov V V, Fal'ko V, Altshuler B L. The focusing of electron flow and a Veselago lens in graphene p-n junctions[J]. Science, 2007, 315(5816): 1252-1255.
- [9] Wogan T. Negative refraction of electrons spotted in graphene[EB/OL]. (2016-10-03)[2016-12-22]. <http://physicsworld.com/cws/article/news/2016/oct/03/negative-refraction-of-electrons-spotted-in-graphene>.
- [10] Chen S, Han Z, Elahi M M, et al. Electron optics with p-n junctions in ballistic graphene[J]. Science, 2016, 353(6307): 1522-1525.
- [11] James A S. Viewpoint: Half-quantum vortices in superfluid helium[EB/OL]. (2016-12-14) [2016-12-22]. <http://physics.aps.org/articles/v9/148>.
- [12] Salomaa M M, Volovik G E. Half-quantum vortices in superfluid ³He-A[J]. Physical Review Letters, 1985, 55(11): 1184-1187.
- [13] Sredzińska K, Galicka A, Brzóška M M, et al. Observation of half-quantum vortices in an antiferromagnetic spinor Bose-Einstein condensate[J]. Physical Review Letters, 2015, 115(1): 437-442.
- [14] Jang J, Ferguson D G, Vakaryuk V, et al. Observation of half-height magnetization steps in Sr₂RuO₄[J]. Science, 2011, 331(6014): 186-188.
- [15] Autti S, Dmitriev V V, Mäkinen J T, et al. Observation of half-quantum vortices in topological superfluid ³He[J]. Physical Review Letters, 2016, 117(25): 255301.
- [16] Wikipedia. Spin Hall effect[EB/OL]. [2016-12-22]. https://en.wikipedia.org/wiki/Spin_Hall_effect.
- [17] Lesne E, Fu Y, Oyarzun S, et al. Highly efficient and tunable spin-to-charge conversion through Rashba coupling at oxide interfaces[J]. Nature Materials, 2016, 15(12): 1261-1266.

- [18] Mohanta N, Taraphder A. Topological superconductivity and Majorana bound states at the LaAlO₃/SrTiO₃ interface[J]. Europhysics Letters, 2014, 108(6): 60001.
- [19] Majorana E. Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone[J]. Il Nuovo Cimento (1924–1942), 1937, 14(4): 171–184.
- [20] Fu L, Kane C L. Superconducting proximity effect and majorana fermions at the surface of a topological insulator[J]. Physical review letters, 2008, 100(9): 096407.
- [21] Mourik V, Zuo K, Frolov S M, et al. Signatures of majoranafermions in hybrid superconductor–semiconductor nanowire devices[J]. Science, 2012, 336(6084): 1003–1007.
- [22] Deng M T, Yu C L, Huang G Y, et al. Observation of majoranafermions in a Nb–InSb nanowire–Nb hybrid quantum device[J/OL]. [2016–12–22]. <https://arxiv.org/abs/1204.4130>.
- [23] Leonid P R, Liu X Y, Furdyna J K. Observation of the fractional ac Josephson effect: The signature of Majorana particles[J/OL]. [2016–12–22]. <https://arxiv.org/abs/1204.4212>.
- [24] Nadj P S, Drozdov I K, Li J, et al. Observation of majorana fermions in ferromagnetic atomic chains on a superconductor[J]. Science, 2014, 346(6209): 602–607.
- [25] Banerjee A, Bridges C A, Yan J Q, et al. Proximate Kitaev quantum spin liquid behaviour in a honeycomb magnet[J]. Nature materials, 2016, 15(7): 733–740.
- [26] Nasu J, Knolle J, Kovrizhin D L, et al. Fermionic response from fractionalization in an insulating two–dimensional magnet[J]. Nature Physics, 2016, 12(10): 912–915.
- [27] Joji N, Yukitoshi M. Phantom Majorana particles found in insulating magnets[EB/OL]. (2016–07–06) [2016–12–22]. <http://www.u-tokyo.ac.jp/en/utokyo-research/research-news/phantom-majorana-particles-found-in-insulating-magnets.html>.
- [28] Sun H H, Zhang K W, Hu L H, et al. Majorana zero mode detected with spin selective andreev reflection in the vortex of a topological superconductor[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(25): 257003.
- [29] He C, Sun X C, Liu X P, et al. Photonic topological insulator with broken time–reversal symmetry[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(18): 4924–4928.
- [30] Wang Q, Yang Y, Ni X, et al. Acoustic asymmetric transmission based on time–dependent dynamical scattering[J]. Scientific Reports, 2015(5):10880.
- [31] He C, Ni X, Ge H, et al. Acoustic topological insulator and robust one–way sound transport[J]. Nature Physics, 2016(12): 1124–1129.
- [32] He C, Chen X L, Lu M H, et al. Tunable one–way cross–waveguide splitter based on gyromagnetic photonic crystal[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(11): 111111–111111–3.

Breakthroughs of condensed matter physics in 2016

GU Lin^{1,2}, LIU Xiaozhi^{1,2}, ZHANG Qinghua¹

1. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences; Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Beijing 100190, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract This article reviewed some important discoveries and achievements in the field of condensed matter physics in 2016. Some examples, such as electron negative refraction, half–quantum vortices and Majorana Fermion, are given to represent low–dimensional quantum systems, correlated systems, topological systems, bandgap regulation, and quantum information.

Keywords topological insulator; functional oxide interface; half–quantum vortices; Majorana fermion

(责任编辑 傅雪)