

量子“高速公路”上的中国战车

中国科学报社 丁佳

量子“高速公路”上的中国战车

■本报记者 丁佳

3月中旬，凝聚态物理学界发生了一件大事。由中国科学院物理研究所和清华大学科研人员组成的团队，在国际上首次实现了“量子反常霍尔效应”。

这一成果在美国《科学》杂志上一经发表，立即引起了不小震动。从上世纪80年代开始，有关量子霍尔效应的研究已先后两次斩获诺贝尔奖，可这一家族中的“量子反常霍尔效应”却一直与全世界物理学家捉着迷藏，不肯露出庐山真面目。

令人着迷的量子世界

在肉眼看不到的微观世界，粒子有自己独特的“生活方式”，它们的行为难以用经典物理学去解释，量子学应运而生。

实际上，量子霍尔效应就是电子在低温条件下所发生的一种奇特现象。“普通状态下的电子是杂乱无章的，它们无序运动，不断发生碰撞。”中科院物理研究所研究员马旭村和副研究员倪珂说，“而对于量子霍尔态的电子则好像置身在一条‘高速公路’上，中间有隔离带，将两个方向的‘车’隔离开。”

也就是说，量子霍尔效应能解决电子碰撞发热的问题，因而在未来的量子计算、量子信息存储等方面具有巨大的应用潜力，因此

设计新一代大规模集成电路和元器件，将会具有极佳的能耗。

在物理学界，但普通的量子霍尔效应却有个麻烦的“抱油瓶”——它的实现需要一个巨大的外加磁场。1988年，美国物理学家霍尔丹提出可能存在一种不需外加磁场的量子霍尔效应，即量子反常霍尔效应。

“外磁场的实现可以用铁磁性材料来解决，但这样一来，物理性质就完全变了，我们需要新的材料体系和物理途径。”戴希说。

可要到哪里找这种特殊材料呢？近几年“大”起来的拓扑绝缘体，给戴希等人提供了新的思路。

2009年，中科院物理所方忠、戴希、美国斯坦福大学教授张首晟等在《自然物理》发表的文章成功预言了 Bi_2Se_3 等一类三维拓扑绝缘体材料并很快在实验上得以实现。紧接着，2010年，他们在《科学》上发表了一篇文章，提出在这种拓扑绝缘体中掺入磁性离子，将可实现量子反常霍尔效应。

“我们就像一条串联电路”

文章出来后，戴希觉得自己可以先歇一歇了。“我们这种方案3年实现起来极其困难，当时就觉得很没戏，我火都冒白了，也等不到量子反常霍尔效应实现的那一天。”

但实际物理学家不这么想。得知戴希等的成果后，中科院物理研究所马旭村和副研究员倪珂放下了材料设计与制备的活儿。“我们生长样品组时，送到清华去测霍尔电阻，然后再回来改进，一天跑几个来回很正常。”倪珂开玩笑说，幸亏两个兄弟单位离得近。

这样的“折返跑”，3年里重复了无数次。据粗略估计，仅是制备掺杂磁性的拓扑绝缘体材料，他们就做了1000次，若加上其他方面的探索，可能还要再上一个数量级。

“这项研究的参与者有三百多人，整个团队就像一条串联电路，我们这些‘电阻’，虽然个头有大有小，但每个人身上通过的电流都是一样的。拿走任何一个‘电阻’，电路都不会通。”戴希感慨，“如果我有这么好的合作模式和流程，很难想象我们会在3年不到的时间里做成这件事。”

“物理学中，很多时候都是实验观察到现象，然后才出理论。他们研究初期时碰巧，是一次从理论到实验的完整过程。”中科院院士于泽评价，“从这项工作中可以看出团队合作的重要性，大家优势互补、协同创新，各领人那观察在一起，才有可能取得重要的创新成果。”

“歪打正着”的背后

何谓常说，材料制备与其说是科学，不如说是艺术。同样一个材料，搭台机器，搞个人就可能做不出来，赖学家的技术不核心。

这次“手艺艺术”何珂也遇到了让他几近绝望的事。团队学术带头人、中科院院士薛其坤要他们制备一张厚5纳米的薄膜，同时还要往里面掺杂磁性材料，薄膜必须非常平整，即一纳米的起伏一纳米都不行。

“有半年时间，我们一点进展都没有，已经把能用的手段都用完了。”何珂回忆，后来一个学生偶然间进在薄膜的覆置层拿了下来，才发现数据信号大大增强了。

“这个覆置层是将膜与大气隔离的，大家做实验都用这个。作科学研究，除了坚持之外，还出点偶然性也是很重要。”

另外一个“歪打正着”的例子是中科院物理所研究员吕力，他和他的学生是戴晚加入这项工作的一支力量。当时材料制备好后，送往清华进行低质量量子输运测量，研究人员偶然得到了一些量子反常霍尔效应的迹象，但总达不到理想状态。

难道实验还要降到更低的温度？他们想到了“降温高手”吕力。

中科院物理所在低温实验方面有着几十年的积累。尤其近年来，吕力所在的实验室在低温实验仪器的自主研发上取得了很大突破。2010年，华人诺贝尔获得者屠呦呦专门从美国借了一块材料，来测试物理所这台低温超导系统究竟有多大本事。结果仪器将电子的温度降到了4mK，也就是比绝对零度高0.004°C的低温。

“材料降温容易，但给电子降温很难。”于泽说，“后来量子反常霍尔效应是在30mK的条件下观察到的，我们还有很大的低温空间，还能进行更精密的实验。”

与团队中其他科学家一样，在吕力看低质量霍尔的“歪打正着”背后，是无数次失败和十数年时间一直的坚持。就像吕力自己的调侃：“我们跟何珂的，不就是三天两夜把自己折腾垮”。

《中国科学报》第1版
2013年4月11日

3月中旬，凝聚态物理学界发生了一件大事。由中国科学院物理研究所和清华大学科研人员组成的团队，在国际上首次实现了“量子反常霍尔效应”。

这一成果在美国《科学》杂志上一经发表，立即引起了不小震动。从上世纪80年代开始，有关量子霍尔效应的研究已先后两次斩获诺贝尔奖，可这一家族中的“量子反常霍尔效应”却一直与全世界物理学家捉着迷藏，不肯露出庐山真面目。

但鲜为人知的是，这篇寥寥数页的论文，不仅是科研人员多年心血的结晶，更已成为中国科学家协同创新的一个典范。

令人着迷的量子世界

在肉眼看不到的微观世界，粒子有自己独特的一套“生活方式”，它们的行为难以用经典力学去解释，量子力学应运而生。

实际上，量子霍尔效应就是粒子在低温条件下所发生的一种奇特现象。“普通状态的电子是杂乱无章的，它们无序运动，不断发生碰撞。”中科院物理所研究员、北京凝聚态物理国家实验室副主任戴希说，“而处于量子霍尔态的电子则好像置身在一条‘高速公路’上，中间有隔离带，将两个方向的‘车’流隔开。”

也就是说，量子霍尔效应能解决电子碰撞发热的问题，因而在未来的量子计算、量子信息存储方面具有巨大的应用潜力，据此设计新一代大规模集成电路和元器件，将会具有极低的能耗。

尽管前景诱人，但普通的量子霍尔效应却有个麻烦的“拖油瓶”——它的实现需要一个庞大的外加磁场。1988年，美国物理学家霍尔丹提出可能存在一种不需外磁场的量子霍尔效应，也即量子反常霍尔效应。

“外磁场的问题可以用铁磁性材料来解决，但这样一来，物理性质就完全变了，我们需要新的材料体系和物理途径。”戴希说。

可要到哪里找这种特殊材料呢？近几年“火”起来的拓扑绝缘体，给戴希等人提供了新的思路。

2009年，中科院物理所方忠、戴希，美国斯坦福大学教授张首晟等在《自然物理》发表的文章成功预言了 Be_2Se_3 等一类三维拓扑绝缘体材料并很快在实验上得以实现。紧接着，2010年，他们又在《科学》上发表了一篇文章，提出在这种拓扑绝缘体膜中掺入磁性离子，将可能实现量子反常霍尔效应。

“我们就像一条串联电路”

文章出来后，戴希觉得自己可以先歇一歇了。“我们的这种方案实现起来极其困难，当时我觉得，没准我头发都白了，也等不到量子反常霍尔效应实现的那一天。”

但实验物理学家不这么想。得知戴希等的成果后，中科院物理所研究员马旭村和副研究员何珂揽下了材料设计与制备的活儿。

“我们生长出样品后，送到清华去测霍尔电阻，然后再拿回来改进，一

天跑几个来回很正常。”何珂开玩笑说，幸亏两个兄弟单位离得近。

这样的“折返跑”，3年里重复了无数次。据粗略估计，仅是制备掺杂磁性的拓扑绝缘体材料，他们就做了1000次，若加上其他方面的探索，可能还要再上一个数量级。

“这项研究的参与者有三四十人，整个团队就像一条串联电路，我们这些‘电阻’，虽然个头有大有小，但每个人身上通过的电流都是一样的。拿走任何一个‘电阻’，电路都不会通。”戴希感慨，“如果没有这么好的合作模式和流程，很难想象我们会在3年不到的时间里做成这件事。”

“物理学中，很多时候都是实验观察到现象，然后得出理论。他们的研究刚好相反，是一次从理论到实验的完整过程。”中科院院士于渌评价，“从这项工作中可以看出团队合作的重要性，大家优势互补、协同创新，各路能人都凝聚在一起，才可能取得重要的创新成果。”

“歪打正着”的背后

何珂常说，材料制备与其说是科学，不如说是艺术。同样一个材料，换台机器、换个人就可能做不出来，极其考验人的技术与耐心。

这次“手艺人”何珂也遇到了让他几近绝望的事。团队学术带头人、中科院院士薛其坤要他们制备一张厚5纳米的薄膜，同时还要往里掺杂磁性材料，薄膜必须非常平整，凹一纳米或凸一纳米都不行。

“有半年时间，我们一点进展都没有，已经把能用的手段都用完了。”何珂回忆，后来一个学生偶然间把盖住薄膜的覆盖层拿了下来，竟发现数据信号大大增强了。

“这个覆盖层是将薄膜与大气隔离的，大家做实验都用这个。作科学研究，除了要持之以恒外，跳出思维惯式也至关重要。”

另外一个“歪打正着”的例子是中科院物理所研究员吕力，他和他的学生是最晚加入这项工作的一支力量。当时材料制好后，送往清华进行低温量子输运测量，研究人员虽然看到了一些量子反常霍尔效应的迹象，但总达不到理想状态。

难道实验还要降到更低的温度？他们想到了“降温高手”吕力。

中科院物理所在低温实验方面有着几十年的积累，尤其近年来，吕力所在的实验室在低温实验仪器的自主研发上取得了很大突破。2010年，华人诺贝尔奖获得者崔琦专门从美国带了一块材料，来测试物理所这台核绝

热去磁系统究竟有多大本事。结果仪器将电子的温度降到了 4mK，也就是比绝对零度高 0.004 的低温。

“材料降温容易，但给电子降温很难。”于淦说，“后来量子反常霍尔效应是在 30mK 的条件下观察到的，我们还有很大的低温空间，还能进行更精密的实验。”

与团队中其他科学家一样，在吕力看似轻松的“临门一脚”背后，是无数次的失败和十数年如一日的坚持。就像吕力自己说的那样：“我们搞科研的，不就是一天到晚跟自己较劲吗？”