

# 狄拉克半金属中的量子输运——手性反常效应与阿哈罗诺夫—玻姆效应

廖志敏<sup>†</sup> 俞大鹏

(北京大学物理学院 人工微结构和介观物理国家重点实验室 量子物质科学协同创新中心  
北京 100871)

2016-03-25 收到

<sup>†</sup> email: liaozm@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20160606

近年来, 物理学家发现了一类非常奇特的拓扑材料(如 $\text{Cd}_3\text{As}_2$ ,  $\text{Na}_3\text{Bi}$ 等), 它们的电子能带结构在动量空间的三维方向都具有线性色散关系, 因此被称为三维狄拉克半金属, 或者“三维石墨烯”材料<sup>[1-6]</sup>。因其特殊的能带结构, 以及在量子计算方面的可能应用, 此类材料迅速成为凝聚态物理领域的研究热点之一。

包括我国科学家在内的多个研究组在狄拉克半金属领域做出了突破性贡献<sup>[1-13]</sup>。中国科学院物理研究所翁红明等人在理论上预言了具有旋转对称性保护的 $\text{Na}_3\text{Bi}$ 和 $\text{Cd}_3\text{As}_2$ 为三维狄拉克半金属<sup>[2, 3]</sup>。英国牛津大学的Y. L. Chen等人通过角分辨光电子能谱(ARPES)观察到了动量空间中的三维狄拉克锥的线性色散关系, 从实验上证实了翁红明等人的理论预言<sup>[4]</sup>。美国普林斯顿大学物理系M. Z. Hasan组及中国科学院物理研究所周兴江组通过ARPES实验分别观察到了狄拉克半金属拓扑表面态<sup>[7, 8]</sup>。

理论研究预测, 狄拉克半金属在时间反演对称性破缺的情况下, 狄拉克点会沿磁场方向劈裂为两个手性相反的外尔点, 从而表现出外尔半金属性质。手性反常是外尔半金属的一个重要特征。当在外尔半金属中施加平行的磁场和电场时, 处于两个手性相反的外尔点附近的外尔费米子将具有不同的化学势, 从而使得电荷在不同手性的外尔点之间迁移, 发生所谓的“电荷泵浦”(charge pumping)<sup>[14]</sup>。由于“电荷泵浦”效应会在晶体中引发额外的电流, 在测量上表现为电阻随磁场增大而减小的负磁阻效应。这类由手性反

常导致的负磁阻效应对磁场和电场之间的夹角非常敏感。因此, 在低温和强磁场条件下研究电导对磁场调制的响应对于寻找“手性反常”等拓扑量子效应至关重要。然而, 由于缺陷、掺杂等导致体材料 $\text{Cd}_3\text{As}_2$ 狄拉克半金属中的背景载流子浓度极高, 难以发现理论预言的手性反常效应。

为了研究狄拉克点附近的物理性质, 我们通过化学气相沉积法合成狄拉克半金属 $\text{Cd}_3\text{As}_2$ , 得到了晶体质量很高的纳米线。尤其是其载流子浓度比当前块体材料低两个数量级以上, 费米能级得以非常靠近狄拉克点。这使得我们能够在 $\text{Cd}_3\text{As}_2$ 单晶纳米线中首次发现负磁电阻效应, 给出了外尔费米子手性反常效应的实验依据<sup>[12]</sup>。值得一提的是, 在其他拓扑半金属体系如 $\text{Na}_3\text{Bi}$ 、 $\text{ZrTe}_5$ 及 $\text{TaAs}$ 中<sup>[9-11]</sup>, 当载流子浓度很低时, 也观测到了相似的负磁阻效应。要观察到手性反常导致的负磁阻, 除了要求材料的载流子浓度较低外, 外加磁场方向也应平行于电流方向。我们在实验中通过改变载流子浓度和改变磁场方向可以有效地调制负磁阻幅值的大小, 并观测到负磁阻向正磁阻的转变, 很好地支持了负磁阻现象源自

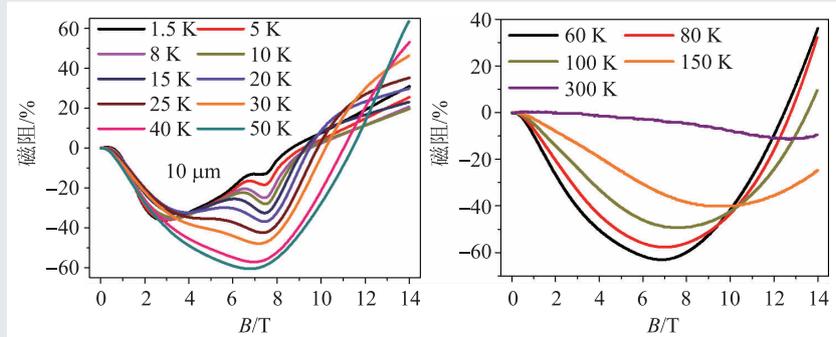


图1 三维狄拉克半金属 $\text{Cd}_3\text{As}_2$ 在1.5 K到300 K的磁阻曲线。从低温到室温均能观察到负磁阻效应

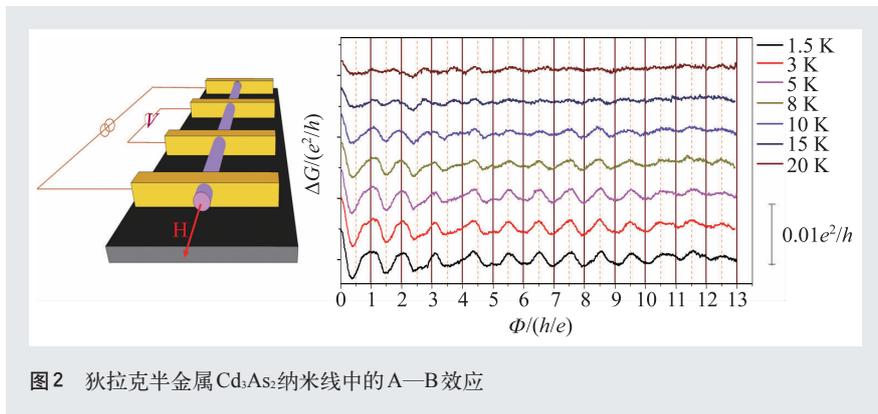


图2 狄拉克半金属 $\text{Cd}_3\text{As}_2$ 纳米线中的A—B效应

手性反常的结论。在不同直径的纳米线和不同厚度的纳米片中均观察到了负磁阻现象,说明该负磁阻是狄拉克半金属中体载流子贡献所致。进一步通过门压调制,测量到了强磁场下由于朗道能级劈裂导致的电导振荡。

理论研究和角分辨光电子能谱实验均表明,狄拉克半金属还存在受拓扑保护的表面态,这种奇异的表面态是由两个手性相反的费米弧组成<sup>[2, 3, 7, 8]</sup>。因此,狄拉克半金属的表面态既区别于拓扑绝缘体表面的二维狄拉克锥,也区别于外尔半金属表面的开放费米弧,是一种新奇的拓扑表面态。然而,由于狄拉克半金属体态本身就是迁移率极高的狄拉克费米子系统,极高的体电导淹没了表面态通道的信号,导致通过量子输运探寻拓扑表面态变得极具挑战。

我们合成的 $\text{Cd}_3\text{As}_2$ 单晶纳米线不仅有低载流子浓度的特点,其比表面积也远大于块体材料,因而在测量表面态输运上具有独特优势。在低温输运测量中,沿 $\text{Cd}_3\text{As}_2$ 纳米线方向施加连续变化的平行磁场,我们观察到磁通周期为 $h/e$ 的电导振荡,即阿哈罗诺夫—玻姆(Aharonov—Bohm,

A—B)效应<sup>[13]</sup>。一般认为,当纳米线表面电子的平均自由程大于纳米线截面周长时,一维受限体系在有限边界条件的情况下会出现表面态子能带的劈裂,随着磁通的变化,穿过费米能级的表面态子能带数也随之发生变化,从而导致电导的振荡<sup>[15—17]</sup>。在 $\text{Cd}_3\text{As}_2$ 纳米线中,在较低磁场

下,A—B振荡的电导峰值出现在整数倍 $h/e$ 处,而在高磁场下,电导振荡峰值出现在半整数 $h/e$ 处,出现了相位 $\pi$ 的转变,暗示了狄拉克点在磁场下劈裂成两个外尔点的物理过程,与我们之前观察到的手性反常效应相互印证<sup>[12, 13]</sup>。

实验上通过门电压调制,我们还观察到了由于费米能级的移动而导致的A—B振荡相位的变化,进一步表明观察到的A—B振荡来自于一维受限系统的拓扑表面态。当增加纳米线的直径,使得纳米线截面周长大于电子的平均自由程时,A—B效应消失,实验上观测到周期为 $h/2e$ 的Altshuler—Aronov—Spivak(AAS)效应<sup>[13]</sup>。

我们的工作揭示了狄拉克半金属材料的量子输运性质<sup>[12, 13]</sup>,观测表明狄拉克点在强磁场下会劈裂为手性相反的一对外尔点,在固体中这种手性粒子能实现低能耗电子传输,在低能耗电子器件方面有着潜在的应用空间;观测A—B效应为研究狄拉克半金属的表面态输运提供了一种有效的方法,拓扑表面态与超导体的耦合将为拓量子计算提供一种新的可能途径。

致谢 感谢博士生王礼先、李彩珍参与此项工作。

## 参考文献

- [1] Young S M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2012, 108: 140405
- [2] Wang Z *et al.* Phys. Rev. B, 2012, 85: 195320
- [3] Wang Z *et al.* Phys. Rev. B, 2013, 88: 125427
- [4] Liu Z K *et al.* Nat. Mater., 2014, 13: 677
- [5] Neupane M *et al.* Nat. Commun., 2014, 5: 3786
- [6] Borisenko S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 113: 027603
- [7] Yi H *et al.* Sci. Rep., 2014, 4: 6106
- [8] Xu S Y *et al.* Science, 2015, 347: 294
- [9] Xiong J *et al.* Science, 2015, 350: 413
- [10] Li Q *et al.* Nat. Phys., 2016, doi: 10.1038/nphys3648
- [11] Huang X *et al.* Phys. Rev. X, 2015, 5: 031023
- [12] Li C Z *et al.* Nat. Commun., 2015, 6: 10137
- [13] Wang L X *et al.* Nat. Commun., 2016, 7: 10769
- [14] Parameswaran S A. Phys. Rev. X, 2014, 4: 031035
- [15] Zhang Y, Vishwanath A. Phys. Rev. Lett., 2010, 105: 206660
- [16] Bardarson J H, Brouwer P, Moore J. Phys. Rev. Lett., 2010, 105: 156803
- [17] Hong S S *et al.* Nano Lett., 2014, 13: 2815