

有趣的近藤效应

朱礼军^{1,2,†} 赵建华^{1,††}

(1 中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室 北京 100083)

(2 美国康奈尔大学 应用与工程物理系 伊萨卡 14850)

2016-06-08收到

† email: zhulijun0@gmail.com

†† email: jhzhao@red.semi.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160706

寻找物质新态是凝聚态物理的重要前沿课题，也是科学家同行们激烈竞争的大舞台。近年

来，随着科学技术的飞速发展，诸如拓扑超导态、拓扑绝缘态、外尔半金属态等一系列新物质态不断在实验中被观测到。金、铜、银等正常金属的电子基态称为费米液体态，其特征为电阻率(ρ_{xx})随温度(T)以 T^2 方式趋于饱和。当金属自由电子屏蔽局域磁性杂质时，就会发生有趣的单通道近藤效应(Kondo effect, 图1(a))，电阻率以 $-\ln T$ 方式随温度下降反常增大。当两个自旋简并的自由电子(各自带有自旋1/2)完全平等地竞争同一个自旋1/2的磁性杂质的“屏蔽权”时，一种新的非费米液体态——双通道近藤效应(Two-channel Kondo effect)便发生了，电阻率开始以 $T^{1/2}$ 方式增加，如图1(b)所示。自1980年对双通道近藤效应的理论预言以来，凝聚态领域的科学家在重费米子超导体、半导体量子点、拓扑近藤绝缘体、碳纳米管和谷电子学材料等多种物质家族积极开展研究，试图寻得有关双通道近藤效应的蛛丝马迹。目前，已有自旋近藤效应^[1]、电荷近藤效应^[2]、拓扑近藤效应^[3]、轨道近藤效应^[4]等多种版本的双通道近藤效应先后被提出来。

在自旋双通道近藤效应中，一个自旋1/2杂质通过交换相互作用与两个等价的轨道通道中导带电子发生反铁磁耦合。然而，这种自旋双通道近藤效应，因其对两个耦合通道严格对称和零局域磁场的苛刻要求，很难从实验上直接观测到。幸运的是，上帝在关上一扇门的同时又打开了一扇窗。1980年，匈牙利理论物理学家Zawadowki预言^[5]：导带两个自旋通道的电子同时竞争屏蔽轨道简并的赝自旋杂质——双能级系统时(图1(c))，将表现出物理上与自旋双通道近藤效应等价但较为稳定的轨道双通道近藤效应(Orbital two-channel Kondo effect)! 在此后的30多年

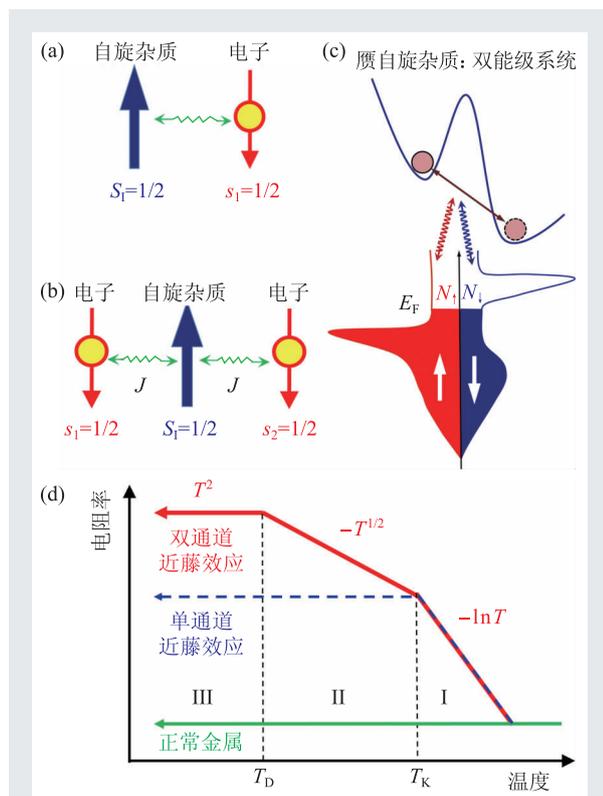


图1 (a)自旋单通道近藤效应示意图，一个导带电子与一个局域自旋1/2杂质反铁磁强耦合；(b)自旋双通道近藤效应示意图，两个轨道简并的导带电子同时屏蔽一个自旋1/2杂质，导致“过屏蔽”；(c)轨道双通道近藤效应示意图，来自两个自旋通道的导带电子同时屏蔽一个赝自旋1/2的轨道杂质——双能级系统；(d)正常金属(绿色)、单通道近藤效应(蓝色)和双通道近藤效应(红色)的极低温电阻率的温度依赖关系。正常金属低温下表现为费米液体行为，电阻率以 T^2 方式趋于饱和；单通道近藤效应低温下由于近藤散射其电阻率随 $-\ln T$ 增加，在近藤温度(T_K)以下恢复费米液体行为；双通道近藤效应低温下表现为电阻率三温区变化，即第I温区由于近藤散射电阻率随 $-\ln T$ 变化，第II温区表现出非费米液体行为，电阻率随 $-T^{1/2}$ 变化，第III温区非费米液体行为失效，恢复费米液体行为

间, 科学家们进行了大量的理论探讨和实验探索, 并且认识到, 对电输运特性的研究可以提供轨道双通道近藤效应的直接实验证据: 三温区电阻率反常上升(图 1(d))、强磁场不依赖性和双能级系统结构无序特性^[6]。20 世纪 90 年代, 美国康奈尔大学 Buhrman 课题组^[7]在铜、钛等多种玻璃态金属纳米点接触器件中观测到的非费米液体态为双能级系统引起的轨道双通道近藤效应提供了 $T^{1/2}$ 温区(三温区中的第 II 温区)的实验证据。然而, 2001 年 Aleiner 等人^[8]从理论上对双能级模型进行了猛烈的抨击, 并将弱耦合极限下的双通道近藤效应送上了历史的绞刑架。2005 年, 匈牙利科学家 Zaránd^[9]提出了双能级系统与导带两个自旋通道的电子发生强耦合条件下的共振散射模型, 认为双通道近藤效应可以在有限温度下观测到。然而迄今为止, 由于结论性实验观测的缺乏, 轨道双通道近藤效应和双能级系统模型的理论预言和实验存在一直饱受争议。

在如此激烈的争议和密切的关注下, 发现一个具有结论性的直接实验证据尤为重要。最近, 我们与美国佛罗里达州立大学物理系教授熊鹏等人合作, 在 $L1_0$ -MnAl 外延薄膜中首次观测到轨道双通道近藤效应的全部电输运证据, 包括三温区电阻率反常上升、强磁场不依赖性和双能级系统结构无序特性, 有力证明了轨道双通道近藤效应的存在^[10]。值得指出的是, 在这项工作中, 利用分子束外延技术, 通过对样品无序程度的精确控制, 成功实现了双通道近藤效应诸如近藤温度、耦合强度、赝自旋杂质特征能量劈裂和体密度等特征参数的有效调控, 从而深度验证了轨道双通道近藤效应的理论模型。这也是首次在具有长程铁磁序的材料体系中观测到双通道近藤效应, 证明了轨道双通道近藤效应可以与自旋极化能带结构共存, 排除了长期以来认为即使很弱的导带自旋极化也可能会降低通道对称性从而彻底破坏轨道双通道近藤效应的疑虑。该发现对将轨道近藤效应的载体从玻璃态金属纳米点接触扩展到扩散输运体系、从非磁体系扩展到长程铁磁体系具有重要的物理意义。最近, 我们在长程铁磁序的

$L1_0$ -MnGa 薄膜中也观测到了很强的轨道双通道近藤效应, 充分证明了双能级模型的正确性和轨道双通道近藤效应的稳定性^[11]。值得一提的是, 由于 $L1_0$ -MnGa 和 MnAl 的巨大垂直磁各向异性^[12], 垂直强磁场下没有各向异性磁电阻和自旋波散射等影响。这为得到双通道近藤效应的磁场不依赖性扫除了障碍, 使得实验证据干净可信。

众所周知, 反常霍尔效应(Anomalous Hall effect)是铁磁金属中最重要的物理效应之一。最近的科学研究表明^[13, 14], 反常霍尔效应强烈依赖于具体的电子散射机制。例如, 与静态缺陷不同, 声子对反常霍尔电阻率(ρ_{AH})的外禀部分(skew scattering 和 side jump)没有贡献。在一般铁磁金属中, 人们发现反常霍尔电阻率和电阻率满足标度关系 $\rho_{AH} = a_0\rho_{xx0} + b\rho_{xx}^2$, 其中 a_0 , b 对大多数铁磁金属为常数, ρ_{xx0} 为剩余电阻率。当反常霍尔效应

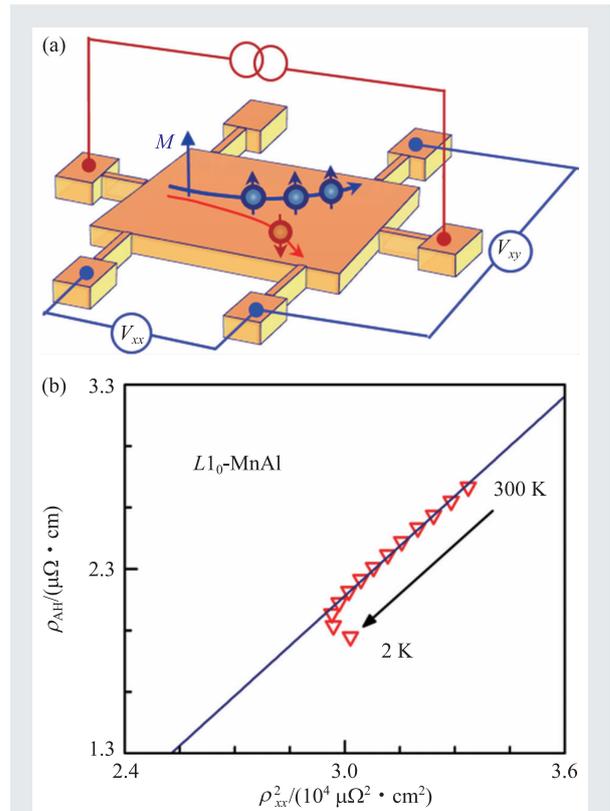


图 2 (a)反常霍尔效应及其测量示意图^[15]; (b) $L1_0$ -MnAl 薄膜反常霍尔效应的标度行为, 较高温度下, 反常霍尔电阻率随纵向电阻率平方线性变化, 满足标度关系 $\rho_{AH} = a_0\rho_{xx0} + b\rho_{xx}^2$, 但低温下由于轨道双通道近藤效应明显偏离该标度关系

CIOE | 中国光博会

18th

中国国际光电博览会
CHINA INTERNATIONAL OPTOELECTRONIC EXPO

精密光学展
镜头及摄像模组展
PRECISION OPTICS, LENS & CAMERA MODULE EXPO

2016.9.6-9
深圳会展中心



CIOE官方应用



CIOE官方微信

**全球规模领先的
光学大展**

同期展会

 OPTICAL COMMUNICATIONS EXPO 光通信展

 LASERS INFRARED APPLICATIONS EXPO 激光红外展

 LED Techna 技术及应用展

 Smartcity China 中国智慧城市 创新产业大会

同期论坛

 中国国际光电高峰论坛
CHINA INTERNATIONAL OPTOELECTRONIC CONFERENCE

了解更多展会信息, 请详询:

 **0755-86290901**

 **CIOE@CIOE.CN**

WWW.CIOE.CN

和双通道近藤效应同时出现时, 会发生什么现象呢? 我们通过对 $L1_0$ -MnAl 薄膜的研究发现^[15]: 在高温下该关系完美描述其标度行为, 但在低温下双通道近藤效应对反常霍尔电阻率产生一个负贡献, 从而导致该标度关系失效, 如图 2 所示。这一结果进一步补充完善了人们对反常霍尔效应的认识, 对强关联电子体系中反常霍尔效应的研究具有重要意义。

参考文献

[1] Potok R M *et al.* Nature, 2007, 446: 167

[2] Iftikhar Z *et al.* Nature, 2015, 526: 233

[3] Kashuba O, Timm C. Phys. Rev. Lett., 2015, 114: 116801

[4] Jarillo-Herrero P *et al.* Nature, 2005, 434: 484

[5] Zawadowski A. Phys. Rev. Lett., 1980, 45: 211

[6] Cox D L, Zawadowki A. Adv. Phys., 1998, 47: 599

[7] Ralph D C, Buhrman R A. Phys. Rev. Lett., 1992, 69: 2118

[8] Aleiner I L *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 86: 2629

[9] Zaránd G. Phys. Rev. B, 2005, 72: 245103

[10] Zhu L J, Nie S H, Xiong P *et al.* Nat. Commun., 2016, 7: 10817

[11] Zhu L J, Woltersdorf G, Zhao J H. 2016, arXiv: 1605.04366

[12] Zhu L J *et al.* Adv. Mater., 2012, 24: 4547

[13] Tian Y, Ye L, Jin X. Phys. Rev. Lett., 2009, 103: 087206

[14] Zhu L J, Pan D, Zhao J H. Phys. Rev. B, 2014, 89: 220406 (R)

[15] Zhu L J, Nie S H, Zhao J H. Phys. Rev. B, 2016, 93: 195112

标准光学元件库存--- 供您随时运用

总量多达10万片, 超过700个品种规格的透镜, 棱镜, 反射镜, 窗口, 滤光片等常用光学器件; 涵盖紫外, 可见, 近红外, 红外等光学应用领域。

 光学透镜	 光学棱镜	 可见光学元件
 红外元件	 颜色滤光片	 窄带干涉滤光片

 **北京欧普特科技有限公司**
Beijing Golden Way Scientific Co., Ltd

地址: 北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋5层东段
电话: 010-88096218/88096099 传真: 010-88096216
邮箱: opt1cs@goldway.com.cn