

# 费米子家族新成员——突破传统分类的三重简并费米子的实验发现

吕佰晴<sup>1,2</sup> 钱天<sup>1,3,†</sup> 丁洪<sup>1,2,3</sup>

(1 中国科学院物理研究所 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

(3 量子物质科学协同创新中心 北京 100190)

2017-07-24收到

† email: tqian@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20170807

1928年,著名理论物理学家狄拉克(Dirac)提出描述带有相对论效应电子态的狄拉克方程。第二年,外尔(Weyl)指出狄拉克方程无质量的解描述的是一对具有相反手性的新粒子,这就是外尔费米子。1937年,马约拉纳(Majorana)预言,当狄拉克方程加上反粒子是自身的限制条件后,则描述的是另一种类型的费米子,即马约拉纳费米子。根据目前的理论,在宇宙空间中,由于受到洛伦兹不变性的限制,仅存在以上三种类型的费米基本粒子,分别被三个基本方程来描述。狄拉克费米子已经被发现,大家所熟知的电子、质子、中子等都是狄拉克费米子,而外尔费米子和马约拉纳费米子还没有在粒子物理实验中被观测到。

另一方面,在固体材料中,众多电子受到周期性晶格和电子-电子间相互作用的影响会表现出不同于单个自由电子的集体行为。这样的集体激发可以看作是一个假想的新粒子,即所谓的准粒子。有趣的是,描述固体中某些准粒子的哈密顿方程和定义宇宙中费米子的基本方程有相同的形式,可以看成宇宙中的费米子在固体中的“影子”。电子所处的固体材料被称为“固体宇宙”,与时空连续的宇宙空间不同,“固体宇宙”只需满足不连续的分立空间对称性,即230种晶体空间群。由于对称性的降低,在“固体宇宙”中可能存在更多类型的准粒子,描述它们的哈密顿方程与基本方程的形式不同,不能被归纳到以上三种类型的费米子,因此超出了对费米子的传统分类。寻找“固体宇宙”中各种类型的费米准粒子是近年来拓扑物态领域一个挑战性的前沿科学问

题,也是该领域国际竞争的焦点之一。

中国科学家在寻找“固体宇宙”中的费米准粒子领域做出了关键的突破性贡献。2012年和2013年,中国科学院物理研究所(以下简称中科院物理所)方忠、戴希、翁红明研究组理论预言 $\text{Na}_3\text{Bi}$ 和 $\text{Cd}_3\text{As}_2$ 是狄拉克半金属,其体态能带存在着受晶格对称性保护的无“质量”的三维狄拉克费米子<sup>[1, 2]</sup>。随后,英国牛津大学陈宇林研究组用角分辨光电子能谱(ARPES)在 $\text{Na}_3\text{Bi}$ 和 $\text{Cd}_3\text{As}_2$ 成功观测到了三维狄拉克锥结构,从而首次证实了“固体宇宙”中三维狄拉克费米子的存在<sup>[3, 4]</sup>。

这些狄拉克半金属中的狄拉克费米子可以看成是两个“手性”相反的外尔费米子在动量空间中的重叠。将它们在动量空间中分开就可以实现外尔半金属态。这需要打破能带的自旋简并,可以通过破缺时间反演或中心反演对称来实现。2011年,南京大学万贤纲教授与合作者通过理论计算提出,烧绿石结构的铋氧化物可能是外尔半金属,其体能带存在相反手性的外尔费米子<sup>[5]</sup>。同一年,中科院物理所方忠、戴希等人理论预言铁磁尖晶石 $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$ 也是外尔半金属<sup>[6]</sup>。它们都是破坏时间反演的外尔半金属。但是由于磁性材料中复杂的磁畴结构,以及ARPES对磁场的屏蔽要求等,使得这些材料的实验观测极其困难。

2015年,中科院物理所翁红明等预言TaAs家族材料是外尔半金属<sup>[7]</sup>。与之前的理论预言不同,TaAs这类材料通过破缺空间反演对称性实现外尔电子态,并且无需进行掺杂等细致繁复的调控,有利于实验的验证。中科院物理所陈根富研究组制备出大块高质量TaAs单晶样品,并观测到外尔

半金属体系中因手征反常导致的负磁阻效应<sup>[8]</sup>。我们在上海光源“梦之线”和瑞士保罗谢勒研究

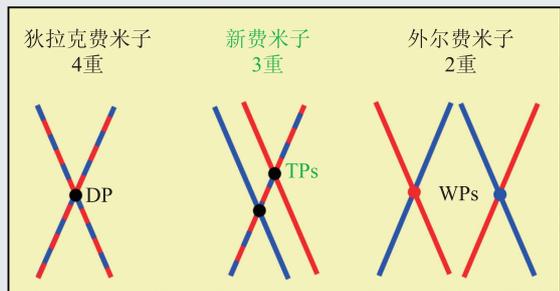


图1 四重、三重和两重简并点的能带示意图，在这些简并点附近的准粒子分别是狄拉克费米子、三重简并的新费米子和外尔费米子。红色或蓝色的直线代表非简并的能带，红蓝交替的直线代表两重简并的能带

所的ARPES实验站上在TaAs(001)解理面成功观测到自旋极化的费米弧和成对的三维外尔锥，从而确定了TaAs中的外尔费米子的存在<sup>[9-11]</sup>。这是自1929年外尔费米子被提出以来，首次在真实材料中观测到外尔费米子准粒子及其奇异的物理特性，具有重要的物理意义。此外，美国普林斯顿Hasan研究组和英国牛津大学陈宇林研究组也得到类似的结果<sup>[12, 13]</sup>。

2016年初，普林斯顿大学Bernevig研究组从晶体的对称性角度出发，对固体材料中可能存在的费米准粒子进行了详细的分类<sup>[14]</sup>。他们预言在具有非简单空间群的晶体中存在三重、六重和八

重简并的新型费米准粒子激发，不同于四重简并的狄拉克费米子和两重简并的外尔费米子。与他们的提案不同，中科院物理所翁红明、方辰、戴希、方忠的理论研究发现，在具有简单空间群的晶体中，也可以存在受晶体对称性保护的三重简并的费米子<sup>[15, 16]</sup>。他们预言，在一类具有碳化钨(WC)晶体结构的材料中存在受三重简并的电子态，其准粒子就是三重简并费米子，介于四重简并的狄拉克费米子和两重简并的外尔费米子之间，如图1所示。此外，瑞士苏黎世联邦理工的研究组也得到了相似的结果<sup>[17]</sup>。

中科院物理所石友国研究组迅速制备出碳化钨家族中的磷化钼(MoP)单晶样品，晶体结构如图2(a)所示。理论计算表明，在考虑自旋-轨道耦合的前提下，晶体对称性会保证沿 $\Gamma$ -A方向自旋两重简并的能带和自旋非简并的能带交叉时不会杂化，从而导致4个三重简并点的出现，如图2(b)所示，在它们附近的准粒子激发就是三重简并的费米子。如图2(c)-(j)所示，我们在上海光源“梦之线”和瑞士保罗谢勒

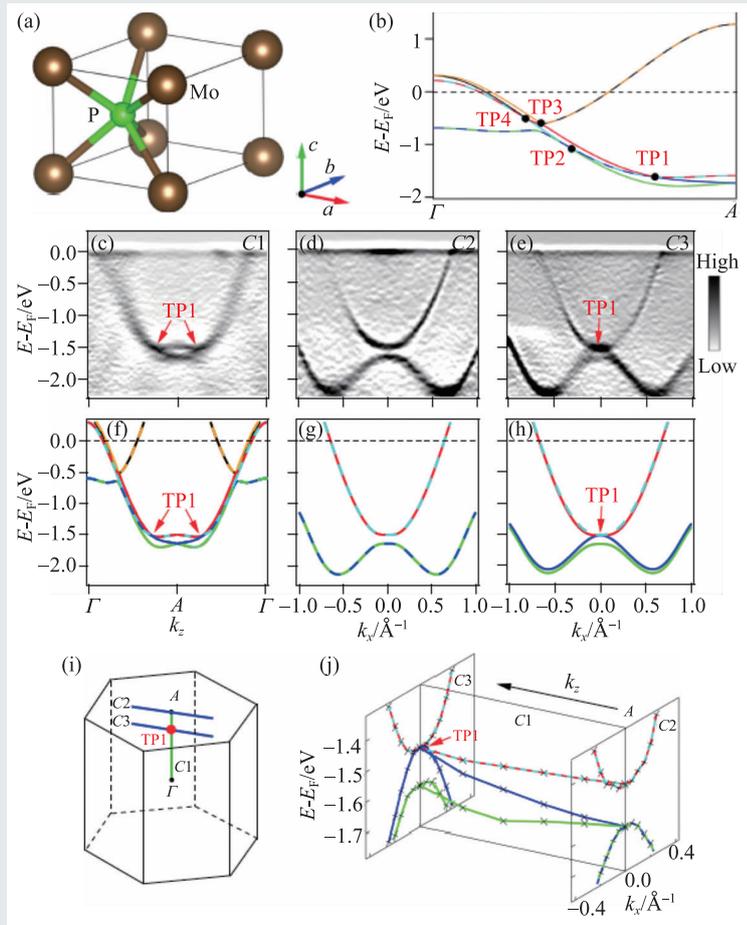


图2 (a)MoP的晶体结构；(b)考虑自旋-轨道耦合前提下，MoP沿 $\Gamma$ -A方向的能带色散。单颜色的曲线代表非简并能带，混合颜色曲线代表二度简并能带，能带交叉点即为三重简并点(黑色圆点)；(c-e)实验测量的布里渊区三个方向C1、C2、C3的能带色散；(f-h)相应的能带计算结果；(i)C1、C2、C3在布里渊区中的位置，其中C1和C3穿过三重简并点(红色圆点)；(j)从实验中提取出的能带色散构成的三维图

研究所经过几个月的实验测量,成功解析出MoP的电子结构,并在C1和C3方向观测到其中的三重简并点,与计算结果高度吻合,首次实验证实突破传统分类的三重简并费米子的存在<sup>[18]</sup>。

MoP中三重简并费米子的发现开启了新型费米子的研究热潮。陈根富研究组成功合成大块高质量的WC单晶,并从中观测到与狄拉克半金属和外尔半金属显著不同的磁场方向依赖的输运行为<sup>[19]</sup>。我们利用ARPES测量了WC的电子结构,并在费米能附近观测到清晰的三重简并点以及连接三重简并点的费米弧表面态<sup>[20]</sup>,确定了它的拓扑性质。此外,德国马克斯—普朗克研究所的科学家在MoP中观测到极低电阻行为<sup>[21]</sup>。

三重简并费米子可以看成介于狄拉克费米子和外尔费米子之间的中间态,为研究各费米子间的拓扑相变及相互作用提供了可能。MoP中的三重简并费米子受晶体对称性所保护,当破坏晶体某个对称性时,三重简并点就会劈裂成为外尔点或者拓扑节线(nodal-line)结构。“固体宇宙”中新型粒子的研究才刚刚开始,未来,除了进一步分析、研究三重简并费米子的独特性质外,寻找更多可能存在的新型费米子也是研究的重要方向。“固体宇宙”中新型费米子的研究对促进人们认识电子拓扑物态,发现新奇物理现象,开发新型电子器件,以及深入理解基本粒子性质都具有重要的意义。

### 参考文献

- [1] Wang Z *et al.* Phys. Rev. B, 2012, 85: 195320
- [2] Wang Z *et al.* Phys. Rev. B, 2013, 88: 125427
- [3] Liu Z K *et al.* Science, 2014, 343: 864
- [4] Liu Z K *et al.* Nat. Mater., 2014, 13: 677
- [5] Wang X *et al.* Phys. Rev. B, 2011, 83: 205101
- [6] Xu G *et al.* Phys. Rev. Lett., 2011, 107: 186806
- [7] Weng H M *et al.* Phys. Rev. X, 2015, 5: 011029
- [8] Huang X C *et al.* Phys. Rev. X, 2015, 5: 031023
- [9] Lv B Q *et al.* Phys. Rev. X, 2015, 5: 031013
- [10] Lv B Q *et al.* Nat. Phys., 2015, 11: 724
- [11] Lv B Q *et al.* Phys. Rev. Lett., 2015, 115: 217601
- [12] Xu S Y *et al.* Science, 2015, 349: 613
- [13] Yang L X *et al.* Nat. Phys., 2015, 11: 728
- [14] Bradlyn B *et al.* Science, 2016, 353: aaf5037
- [15] Weng H M *et al.* Phys. Rev. B, 2016, 93: 241202
- [16] Weng H M *et al.* Phys. Rev. B, 2016, 94: 165201
- [17] Zhu Z *et al.* Phys. Rev. X, 2016, 6: 031003
- [18] Lv B Q *et al.* Nature, 2017, 546: 627
- [19] He J B *et al.* Phys. Rev. B, 2017, 95: 195165
- [20] Ma J Z *et al.* arxiv: 1706.02664
- [21] Shekhar C *et al.* arxiv: 1703.03736



## 微弱信号检测 半个世纪的骄傲

Model 7265  
数字锁相放大器

经典机型  
业内翘楚



Model 5210  
模拟锁相放大器



生产商: 阿美特克商贸(上海)有限公司北京分公司  
电话: 010-85262111-10 传真: 010-85262141-10  
Email: info@ametec.cn  
网址: www.signalrecovery.com.cn

中国代理商: 北京三尼阳光科技发展有限公司  
电话: 010-65202180/81 传真: 010-65202182  
Email: sales@sunnytek.net  
网址: www.sunnytek.net

**SOPHISTICATED CONTROLS SHOULD  
BE IN THE HANDS OF HIGHLY TRAINED  
PROFESSIONALS...**

**...THE SAME GOES FOR ACCELERATOR  
CONTROL SYSTEM INTEGRATION**

Your **TRUSTED** Control System Partner



**COSYLAB**

[www.cosylab.com](http://www.cosylab.com)