



## Eureka: 固体“宇宙”中的外尔费米子\*

丁洪<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

外尔(Hermann Weyl, 1885—1955年)是20世纪伟大的数学家、物理学家和哲学家。他是大数学家希尔伯特(David Hilbert)的学生,并且在希尔伯特退休后继承了其教授职位。上世纪三十年代因不满纳粹的迫害,外尔接受了普林斯顿高等研究院的邀请,与爱因斯坦、冯·诺依曼形成了当时高等研究院著名流亡科学家的三人组合。

外尔一项很重要的工作是在1929年做出的。狄拉克方程是在1928年提出的,它把量子力学和相对论结合起来,是个4×4的矩阵方程。重要的是,它预言了正电子。正电子的预言在很大程度上是受了外尔的启发。随后外尔又做了进一步推

广:当狄拉克费米子无质量时,可看作是两个具有不同手性的或者说带相反拓扑“电荷”的外尔费米子的重合。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分开,或者在实空间,或者在倒空间。这时狄拉克方程可以被简化,成为著名的外尔方程。外尔在1929年发表了题为“Electron and gravitation”(Z. Phys., 1929, 56: 330)的文章。1986年杨振宁先生曾评价过这篇文章:“我现在讲一下外尔做的另一个重要工作,即外尔双分量中微子理论。他在1929年一篇非常重要的文章创立了这个理论,作为一个满足大多数物理规律的数学解。但后来他和其他物理学家拒绝了这个理论,因为它不满足左右对称性。”当时外尔是很追求美的,他曾经说过:“我总是试图将真实与美丽结合起来,但如果我不得不做出选择,我一般会选择美丽。”外尔认为左右对称性的破坏是不美的。但在1957年杨振宁和李政道发现左右对称性并不是严格成

2016-03-24收到

<sup>†</sup> email: dingh@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160412

\*本文是根据2016年3月4日作者在Mind Concert Academic Salon中的报告整理而成。Mind Concert Academic Salon是“中关村科学沙龙”系列活动之一,由《物理》编辑部主办,得到了中国科学院科学传播局的大力支持。

立，人们马上意识到外尔这个理论应该被重新重视。之后理论和实验都证明他的这个理论给出了中微子的正确描述。因为认为中微子是具有手性的，而且所有的中微子都是左手性的。因此在很长一段时间(1958—1998年)人们非常相信中微子是外尔费米子，是无质量的，也就是无质量的狄拉克费米子的一个解。但1998年之后又发现中微子有振荡(即具有微小质量，这一成果在2015年获得了诺贝尔物理学奖)。中微子有质量就否定了它的外尔费米子属性！目前还不知道宇宙中是否存在“外尔费米子”这一基本粒子，在这种意义上，有人将其称为“幽灵粒子”。

发现外尔费米子的新途径来自固体材料的“拯救”：准粒子。什么是准粒子？在固体材料的“宇宙”中，亿万个电子通过相互作用形成一种决定其母体材料性质的“准粒子”，这些准粒子与基本粒子可能会遵循相同的物理规律，例如2004年发现的石墨烯就具有无质量狄拉克费米子的“准粒子”(2010年诺贝尔物理学奖)。

我们要找的是基本粒子——外尔费米子，现在说的是准粒子。准粒子和基本粒子有什么区别呢？有一个猜想：也许我们所谓的基本粒子(质子、电子、光子等)就是宇宙“真空”相互作用产生的“准粒子”，它们也体现我们这个宇宙的集体性质。如果有多个宇宙，另外的宇宙会有不同的质子、电子和光子，或者有不同的光速！在这个层次上，也许凝聚态物理和高能物理可以“统一”。正如凝聚态物理学家安德森在1962年首先意识到超导体中的一种有能隙的元激发可以用来解释宇宙中基本粒子的质量起源，希格斯在这基础上于1964年提出具有相对论的理论，并预言希格斯玻色子的存在。现在这种思想被越来越多的物理学家所接受。

清华大学以前的一个学生最近发表了篇文章，里面有段话写得非常好，他说：“粒子的定义不来自于自身而来自于整个真空的集体作用。这正反映了还原论和演生论两种不同思路的对比。在还原论的观念中，真空只不过是舞台，粒子才是舞台上的主角；而在演生论的观念看来，

真空不但积极地参与了粒子建构，而且实际上决定了粒子的行为。而粒子本身的意义反而变得模糊，或者说粒子只是作为真空的运动模式的物化体现。而这种运动模式的具体规律则由真空的序(组织方式)决定，这也就是凝聚态物理的核心观念：序决定激发，真空决定粒子。”演生论最早是由安德森提出来的，他早在1972年就写了一篇很有名的文章“More is Different”，就是说“多者异也”。实际上是组成成分足够多后就可能产生了完全不同的准粒子。

再进一步说准粒子与基本粒子的启示。这里主要引用文小刚教授提出的来自拓扑序的大统一理论——弦网理论。这个理论在将近十年前提出来，当时相信的人不多，现在却已经成为物理界的一个流派。这个理论认为，宇宙真空中充满了像“面条”的弦网，弦网的振动产生光子，弦网的端点产生电子。文小刚说过“在凝聚态物理的研究中，我们发现了拓扑物态，发现了拓扑物态的本质就是长程纠缠。凝聚态物理拓扑物态，给基本粒子的起源，提供了突破口。”现在他们就在试图去理解这个事情，事实上就像理解为什么中微子仅具有左手性。有一点可以借鉴于三维的宇宙，三维宇宙是高维的比如四维宇宙的一个表面态，所以在这一面只有左手性，镜像宇宙是有右手性。这个思路是目前最新的。

从数学上来说，费米子有三种：不带质量的外尔费米子、带质量的狄拉克费米子、质子与反质子相同的马约拉纳费米子。拓扑比较简单，拓扑与连续变形是有关的。一个环和一个扭过来的莫比乌斯环，它们的欧拉表征数不一样，一个为0，一个为1。0和1可以严格区分，这与奇点有关，连续变形是要经过一个奇点。比如对于电子的散射，拓扑会导致在样品边缘上自旋向上的电子沿一个方向走，自旋向下的电子沿反方向走，也就是相互之间没有杂乱的散射，也会避免非磁性杂质的散射。

外尔费米子是无质量带手性的电子。晶体中电子“有效质量”起源于电子态有两种“手性”：左手+右手。左手与右手电子态的耦合导

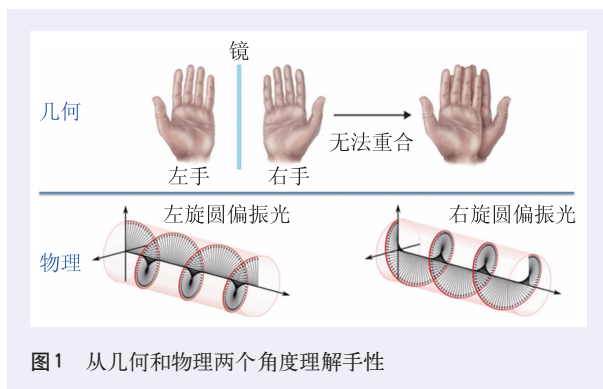


图1 从几何和物理两个角度理解手性

致了“有效质量”。外尔半金属中左手与右手电子态在动量空间分离，导致了无质量的电子，因此可能无损耗地传输。在凝聚态物理中一个最高的追求，就是改变材料中电子态的基本属性，例如超导体中把电子配对，使费米子变成玻色子，这样就可以做成“无体积”的粒子，像一个超流，可以无阻力地通过晶体。外尔半金属使电子的手性分离，从狄拉克费米子变成外尔费米子从而导致无质量和手性的出现，同样可以达到低功耗的传输。举个例子，超导实际上是来自于电子受到晶格振动所导致的有效吸引力，两个费米子会形成一个玻色子，玻色子的电子对成为电荷超流，所以它可以无阻力的传输电流。

我多次提到手性，到底什么是手性？我们都有左手和右手，左手和右手不能重合起来，只有在镜子中间重合。物理上怎么定义手性？具有手性的物理量，比如说圆偏振光，偏振指光波中的电场振动方向，电场方向做旋转时，跟光走的方向去比有两种可能性，一种叫左旋圆偏振光，一种叫右旋圆偏振光。我们知道，在相对论中，任何低于光速的运动方向都是相对的。一辆车往前开，如果另一辆车速度更快往前开，那么对于高速的车，低速的车在往后开，参照系变了，方向会反转。同样低于光速时，所谓的左旋和右旋是不严格的定义。手性和速度有关系，只有在光速时手性才能严格定义，光速也就意味着无质量。外尔费米子具有手性和无质量是紧密联系的。

生命体中也有手性，生命体中的氨基酸都是左旋氨基酸。可能原因有很多种，目前有两个理论越来越流行。一种是生命的演化、宇宙的起源

导致的，与圆偏振光对形成行星的星云照射有关；第二种是与弱相互作用的宇称不守恒相关，宇称不守恒导致了生命中的手性。最开始人们觉得这是天方夜谭，但是目前作为很严肃的课题在研究。《自然》杂志曾经登出五个物理学界最难的实验，其中一个就是测量宇称不守恒如何导致生命体的左旋氨基酸的实验。

物质从结构上分为绝缘体和金属，绝缘体在导带和价带之间有能隙。如果能隙关闭之后，自旋轨道耦合很强可以重新打开一个能隙，这就形成了拓扑绝缘体。金属没有能隙，介于金属和绝缘体之间的是半金属。半金属有普通半金属，也有拓扑半金属。拓扑半金属又分为三种：外尔半金属；狄拉克半金属；nodal line半金属。首先发现的是狄拉克半金属。狄拉克半金属可以认为是三维的石墨烯，有无质量的狄拉克锥。通过掺杂可以把对称性破坏从而打开能隙，也可以加磁场破坏时间反演对称性。无质量的狄拉克费米子可以看作是两个外尔费米子的重合，一旦对称性被破坏，两个外尔费米子就会分开。中心对称性的破坏同样可以使两个外尔费米子分开。狄拉克半金属预言不久，在2014年通过角分辨光电子能谱被证实。从狄拉克半金属出发，就开始设想怎样找到外尔半金属。外尔半金属有一些很奇特的性质，比如费米弧、手性奇异性。费米面一般是闭合的，但是在外尔费米子表面态中间是不闭合的。在麦克斯韦方程中，有手性意味着电荷不守恒，意味着有磁单极，电荷不守恒性称为手性奇异，如果在材料中成对出现磁单极就会产生负磁阻现象。

2011年，南京大学万贤纲预言一种磁性材料是外尔半金属(*Phys. Rev. B*, 2011, 83: 205101)，但是材料磁结构复杂不好证实。翁红明、戴希、方忠找到一种结构简单的物质砷化铌(TaAs)，只是破坏了中心反演对称性，有外尔点和外尔锥，代表着磁单极的南极和北极，有12对外尔节点。砷化铌具有手征性奇异性，违反电荷守恒性，但是在一个材料中表现出来就是具有负磁阻，这是中国科学院物理研究所陈根富组测到的(arXiv:

1503.01304); 再者就是在表面态中具有开放的费米弧, 这由我们组(arXiv:1502.04684)和美国普林斯顿组(arXiv:1502.03807)两个团队独立和几乎同时发现。

手性异常表现为一支能带是电荷产生, 另一支是电荷消失, 输运是靠两支能带中间的相互作用, 导致负磁阻的产生。负磁阻可以看成是一个一维的导体, 磁场越强, 导体的朗道能级越多, 导电性就越好, 即磁场强电阻小, 称为负磁阻。随着电阻越来越小, 甚至可能产生零电阻。费米弧要从拓扑的角度去理解。早在1998年, 我们的一篇高温超导体的文章中(*Nature*, 1998, 392: 157), 提出过费米弧的概念, 在无能隙态中也会出现费米弧, 但那个费米弧是不同的概念。

那我们怎么观察到费米弧? 使用的测量工具是角分辨光电子能谱(ARPES), 原理是光电效应, X射线打进去, 把电子打出来, 测电子的动量和能量, 也就是电子的能带结构, 从而可以测出材料体内和表面的电子态。光源是上海的“梦之线”, 它是世界上分辨率最高、能区最宽的同步辐射光束线, 对同样的样品, 低能光子测量表面态电子, 高能光子可以测量体态电子。

“外尔费米子”的发现历程是这样的: 2013年9月, 方忠、戴希理论小组的翁红明意识到TaAs家族可能是外尔半金属; 2014年7月, 理论小组对TaAs中可能在外尔半金属态进行的理论证明获得突破; 2014年7月, 陈根富小组开始了材料制备的工作, 很快长出TaAs高质量的单晶样品; 2014年10月, “梦之线”通过了工艺验收, 我们便开始测量, 并得到初步结果; 2015年1月初, 样品质量得到提高, 我们获得更好的数据, 从实验上找到了费米弧存在的确定证据。

在确认与新计算出来的理论结果完全吻合时, 我在2015年1月31日微信给饶毅: Eureka! 并于2月中旬

在网上登出文章公布结果, 同时投稿第一篇文章; 2015年2月底, 我的学生吕佰晴去瑞士光源测量到TaAs体态外尔锥形电子结构, 于3月底在网上登出文章公布结果, 并同时投稿第二篇文章; 2015年7—8月, 两篇文章分别在 *Physical Review X* 和 *Nature Physics* 发表。

以前认为TaAs电子态不好测, 因为它既有Ta, 又有As, 不好区分。事实上, 测量到的只有As面。经过对理论中表面势能的调整, TaAs的表面态和As计算出来的几乎一样。2015年1月31日, 翁红明把调整好的结果发过来时, 我说“Eureka”, 因为这么像, 不可能是一个巧合。在对比计算的费米面和我们测量的费米面时, 相似度非常高, 细节也非常相似。数学上证明也存在一个费米弧。最后我们把整个费米弧的连接方式也弄清楚了。

测体态信息要用高能的光子, 在软X射线区, 找出两个分离的狄拉克锥, 我们通过调节不同能量和不同的 $k$ 空间, 在理论预言的地方, 测

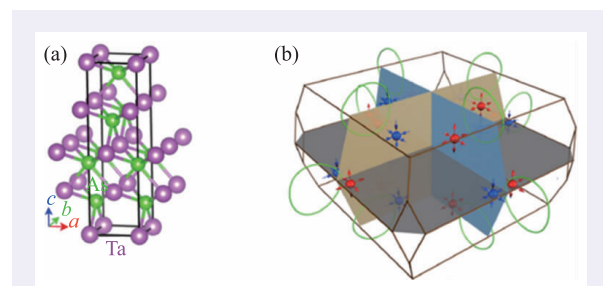


图2 在非中心对称TaAs家族中预言存在外尔费米子 (a)TaAs晶体结构; (b)晶格动量空间里外尔节点的分布, 红、蓝小球代表不同手性的外尔节点

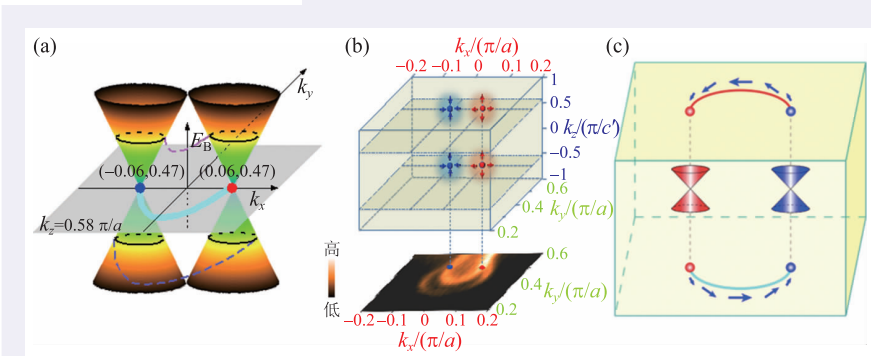


图3 固体中发现外尔费米子的重要证据 (a)外尔节点处的锥形色散关系; (b)体内外尔节点投影到(001)表面, 投影点由费米弧连接; (c)体内外尔点与上下表面费米弧的关系示意图

量到一对分离的外尔准粒子。另外，我们还做了自旋结构的测量，跟理论中的自旋结构也是符合的。因为表面下面的体内有南极和北极，通过相互作用，导致材料特有的自旋方式，间接证明了表面下体内蕴藏着南极磁单极和北极磁单极。

这三篇文章(Pairs of Weyl nodes in the bulk (*Nat. Phys.*, 2015, 11: 724); Fermi arc on the surface(*Phys. Rev. X*, 2015, 5: 031013); Spin texture of Fermi arc (*Phys. Rev. Lett.*, 2015, 115: 217601))给出了足够多的信息证明我们发现了外尔费米子，这也是首次在固体材料中发现外尔费米子。外尔费米子的发现不仅对材料本身，而且

还会对高能物理的理解，有着更深刻的认识，产生更大的影响。

外尔费米子的发现入选美国物理学会评选出的2015年物理学8项标志性进展和英国《物理世界》评出的2015年物理十大突破。材料中的电子行为有电荷电子学、自旋电子学和轨道电子学，如果有手性，是不是可以产生手性电子学行为？能否利用手性电子学制造低能耗、高性能、突破量子尺寸效应限制的器件？确实有可能，但这些都只是设想，未来还不确定，现在就展望外尔费米子的发展将给未来生活带来多大的变化，既不现实，也不科学。

ILOPE“24年”光电行业专业展会品牌，助力企业价值跃升



**第二十一届中国国际激光、光电子及光电显示产品展览会**  
同期展会:第十三届中国国际机器视觉展览会暨机器视觉技术及工业应用研讨会

2016年10月17日-19日  
北京·中国国际展览中心(静安庄馆)

◆激光

◆红外

◆光学材料

◆光电显示及照明

展位抢定，请立即洽询：

☎ 010-84600314 / 84600836

展馆地址：北京市朝阳区北三环东路6号

ILOPE新版网站全面升级，欢迎登陆 [www.ilope-expo.com](http://www.ilope-expo.com) 了解参展参观详情！



官方微信 欢迎关注