

# 张首晟教授

## 与杨振宁奖学金得主的座谈会\*

DOI: 10.7693/wl20131106



张首晟教授，著名的华裔美籍物理学家，是斯坦福大学的 JG Jackson 以及 CJ Wood 教授，他因为在拓扑绝缘体、量子自旋霍尔效应、自旋传输电子以及高温超导等研究领域的卓越贡献而蜚声国际。张首晟教授于 2012 年荣获凝聚态物理的最高奖项：美国物理学会 Oliver Buckley 奖；同年 8 月，荣获联合国教科文组织下属的国际理论物理学中心的“狄拉克奖”。2013 年 3 月 20 日，张首晟教授因在拓扑绝缘体方面的研究荣获“物理学前沿奖”。

杨振宁教授是张首晟教授在美国纽约州立大学石溪分校攻读博士学位时的导师，与此同时，张教授跟随着他导师的脚步，成为了所有华人物理学家心中的楷模。

在新加坡南洋理工大学 2013 年 8 月 26 日的互动座谈会上，张教授分享了他个人特别是在拓扑绝缘体领域方面的研究经验和心得。拓扑绝缘体的理论以及其应用前景，已经预示了技术产业的革命性发展。

\* 本文根据张首晟教授于 2013 年 8 月 26 日在新加坡南洋理工大学与杨振宁奖学金得主的互动座谈会整理而成。

张教授：感谢大家的邀请，十分荣幸能够来到南洋理工大学和大家做一个近距离的互动。我个人觉得，作为一名大学教授和教育工作者，最大的回报之一就是可以和年轻人保持紧密地联系和接触，同时让自身保持年轻的心态。今年是我在斯坦福大学的第二十年。这二十年间，我们做了许多非常有趣的研究。而这当中，让我特别有成就感的事情就是，很多我指导的博士生目前都在美国的顶尖研究机构和大学任教。说个题外话，来这里之前，我的儿子告诉我，他的一位好朋友也在现场。我猜想他们是一起去了国际物理奥林匹克竞赛。我的儿子和今天在场的其中一些杨振宁奖学金得主的年纪相仿。我在指导学生以及与就读哈佛物理专业的儿子的互动过程中，时常思考如何帮助这些年轻人。所以，我希望今天我们可以有很好的互动，你们若有任何疑问，我也会尽量回答。

作为报告的开始，我先向你们介绍有趣的课题——“什么是拓扑绝缘体？”我认为从事科学研究的人，最原始的驱动力应该是好奇心，而不是这个东西是否有应用价值。这个课题是始于提出疑问并寻找有趣的数学结构。当你开始观察这个貌似抽象的课题时，你会发现两个不常联系在一

起的词汇：拓扑和绝缘体。拓扑是个非常抽象的数学原理，而在当今的数学界，拓扑理论绝对是其中一个最重要的分支。大家回想一下，就是在2003年，庞加莱猜想，这个数学领域最基本的猜想之一，在百年之后终于被证明了，而庞加莱猜想就是一个拓扑学中带有基本意义的命题。与此同时，绝缘体是一个听起来非常枯燥的材料，但它们却可以广泛地被应用，例如在半导体工业中。对于这两个听起来不相关的概念，我们还是设法把它们结合到了一起：一个是抽象的数学概念，一个则是种实际的应用材料。我们必须了解基础研究对我们今天的信息社会的重要驱动作用，比如说摩尔定律(它是讲述半导体晶片上的晶体管数量每18个月就会翻倍)。我们多次都面临着如何持续增加晶片上可装置晶体管数目的问题，但最终都能克服困难解决问题。很多工业，比如汽车工业，都只有相对平缓、线性的增长，但是半导体工业和信息产业的产品工作效率可以保持成指数增长，这就是理论驱动的力量。因为有摩尔定律告诉我们，半导体晶片上的晶体管数量每18个月就会翻倍，或者计算速率每18个月就会翻倍，所以过去60年都是这样。

60多年前，物理学家在信息产业的起步阶段起了决定性的作用。在量子力学的理论指导下，我们把材料按照能级划分，这就是能级理论。我们有价带、导带，如果绝缘体的费米能级在导带和价带之间，我们就有了空穴型半导体或者电子型半导体。这就譬如我们给你一个N型载体、空穴型载体，因为这种材料的密度很低，我们可以做出很有趣的掺杂。半个多世纪前，物理学家巴丁和肖克利(John Bardeen and William Bradford Shockley)发明了晶体管，而其他物理学家建立了量子力学体系。此后，物理学家就把整个课题都交给了工程学家。因为基础理论已经了解清楚，而我们



座谈会现场

的好奇心再次驱使我们到另外一个更加有趣的课题，于是我们把这类问题留给了更加有能力处理工程问题的工程学家们来解决。在过去的六七十年里，他们取得了非凡的成就，半导体工业和信息产业在这期间所创立的丰功伟绩也应该归属于他们。但是，摩尔定律已经到达它的极限，无法持续几何性的增长。由于基础理论的关系，人们一直怀疑摩尔定律不能一直适用，但是，工程学家们非常聪明，每次遇到瓶颈的时候，他们都能找到某种方式来克服这些困难。现在理论上的难关是关于晶片散热的问题。我们在晶片上组装晶体管，每当晶体管的数目翻倍，它们所产生的热量也就成指数数量级增长。根据摩尔定律，当我们组装越来越多的晶体管在晶片上面，它们所产生的热量也就随之增加，最终会导致晶片上的热量过多，从而使晶片无法工作。

年轻人首先应该具有判断黄金年代何时到来的智慧，才能有机会做出伟大的发现。六十年前，物理学家们起到了一个非常重要的作用。我们不仅建立了基础原理体系(如量子力学)，同时也发现了半导体材料。现在工程学家面临着一个工程学无法解决的难题，所以这个难题就又要回到我们物理学家手中，这也预示着物理学家的黄金时代的到来。我们总说“危机”，中文中，“危”字代表危险，“机”的意思是机遇、机会。所以，作为物理学家，我们应该感受到我们正处于一个非常重要的历史时刻，我们必须保证当代文明按照信息年代的特征来持续发展，目前，问题的本质就是电子导致晶片过热。我们的信息时代是建构在两种基本粒子上，通讯是建立在质子的基础上，而计算是建立在电子基础上。

光子之间的相互作用非常薄弱，它们可以远距离传输信息而没有什么耗损，这也是选择它们作为远距离信息传输载体的主要原因。但是，也因为它们之间的相互作用很弱，所以很难被控制，没有什么旋钮可以用来旋转它们，进而使质子有不同的表现。我们之所以选择电子来进行逻辑处理，主要是因为电子之间的强相互作用。如果晶片里面装的是电子，相对晶片而言，电子就好像是晶片这个繁忙的集市里面的法拉利跑车。新加坡也有一级方程式赛车，为了确保比赛顺利进行，我们必须进行清路。可想而知，如果让世界上最好的赛车在繁忙的集市里面行驶，它们也无法发挥出它们该有的状态，因为这些赛车会不停地互相碰撞，或者不停地撞到障碍物，其实，建一条高速公路就可以解决这个问题。高速公路的工作原理就是让不同方向行驶的汽车奔驰在不同的单行线上。所以拓扑绝缘体就好像为电子建了一条高速公路，这样就不会有延迟和耗散等问题。

在我们人类社会，不同的国家有不同的交通规则，好让车辆顺利行驶。比如新加坡是全世界为数不多的靠右侧通行的国家之一。不过，物质



张教授在介绍“拓扑绝缘体”

必须先有不同的电子能级状态，才能规划电子的运行轨道，在拓扑绝缘体中，电子是平行移动的，自旋向上的电子朝着一个方向前行，在右侧时朝前行进，在左侧时则朝后，而自旋向下的电子则是情况完全相反。按照以上的描述，可想而知，这个系统需要电子自旋，并且和轨道运动有着最基本的相互作用，也就是自旋—轨道相互作用。因此，我们不仅知道电子需要运行在所谓的“高速公路系统”，也知道什么样的基础互动才能使电子这样运行，亦即电子的自旋方向决定电子如何在物质中运动，这就是我们所发现的拓扑绝缘体的基本特性。对这个研究感兴趣的同学可参阅2010年1月刊登在*Physics Today*(《今日物理》)杂志上的一篇文章，这篇文章按照物理本科生的水平，深入浅出地介绍了拓扑绝缘体。此外我们也有了一篇*Review of Modern Physics*的文章(Xiao-Liang Qi and Shou-Cheng Zhang. Topological insulators and superconductors, *Review of Modern Physics*, 2011, 83: 1057), 更加深入地阐述这项研究。

我相信在场的同学们很多都看过《生活大爆炸》，应该是在2011年，这部剧集提到了我们的研究：谢尔顿·库珀一踏入教室就问大家是否听过或了解拓扑绝缘体，那时大家都把手举了起来。那一刻真的是非常特别也很难忘，因为大学老师平常讲课时只接触大约100位学生，而就因为我们的“拓扑绝缘体”这个词，一息之间就有了四千万的关注。我明早11点将在庆祝Freeman Dyson 90岁华诞的学术会议上报告更多关于拓扑绝缘体的内容，欢迎有兴趣的同学参加。这大概就是拓扑绝缘体的故事。

现在，我想和大家分享一下为什么我觉得物理那么有趣，那么引人入胜。首先，拓扑这种数学概念完全是由抽象思想而出，拓扑理论研究在一百多年前开始发展。我想，数学家思考时最基础的指导原则就是在构思概念时所能孕育的美感。坦白说，真正好的数学和不太好的数学有什么分别呢？所有物理原则在某种程度上都能通过实验来证实，因此从某种方面来看，物理和自然真理有很大的关系，因为物理必须符合大自然的

运行法则。数学却不一样。数学家能构思出和自然运行法则毫无关联的公理系统。打个比方，比如说欧几里德几何定理，因为欧几里德认为两条平行线永远不可能交叉这个观察是非常明显的事实，他从而推出他的公理系统。同样地，之后也有其他数学家提议：“不如把这些公理推翻，开始奇异的新世界？”这也就奠定了黎曼几何的基石。当数学家构思像黎曼几何这样的概念时，往往纯粹是被美感而激发。数学的灵感其实是任何人都可以创造和现实毫无关系、属于自己的一套数学系统，而这系统好不好是按个人的审美观而定，因此说数学的灵感在于美感。

这种源自简洁、被美感所激发的理论被证实的那种兴奋我们也体会过。当爱因斯坦想用公式表达他的广义相对论时，他很幸运地发现了数学家已经从纯粹的抽象思维中构思出了黎曼几何。而物理史上最伟大的时刻就是亚瑟·爱丁顿证实爱因斯坦的理论的那一刻。爱因斯坦当时使用了几何，不过我想任何数学家都会同意拓扑比几何更有基础性。因此，当这些具有抽象美感的拓扑概念被证实时，虽然不及爱因斯坦当时的程度，不过却具有相同的意义，也算是物理史中非常难得的时刻。这是其他学科较稀有的、物理研究所特有的时刻。其他学科主要依赖实证研究，在进行实验时偶然发现一些现象，过后才试图解释这些现象。相比之下，物理研究更显优雅。这就是物理令我如此着迷的原因，我也总是尝试和年轻人分享我的心得，向他们强调，在物理史上以美感构思出的原理总是能一再地被证实，拓扑绝缘体研究正是最佳的一个例子。就如同其他学科一样，当我们关注凝聚态物理和材料科学一路来的发展时，大多数的发现都非常偶然，例如超导体、量子霍尔效应、超流态等都是偶然发现的，磁性也是中国人两千年偶然发现的。这些例子都是先有实证知识，而后才发展出抽象理论。拓扑绝缘体则是先构思出抽象理论框架。我们当初按着这些概念的指引，我们使用的数学框架竟然如此之强悍，以至于可以指引我们预测出真实存在的材料可以成为拓扑绝缘

体，甚至精准地预测出碲化汞这种材料。不仅如此，我们还预测了这些材料在什么条件下可以展现拓扑绝缘体的特性，而这些预测一年后都被德国的一个实验室所证实了。这些事实体现了我们对于自然法则的了解已经达到了可以实现如此精准的预测。作为这个理论的构思者，我们就更加倍感骄傲，这样的兴奋想必爱因斯坦以及爱丁顿当时也感受过。

**主持人：**下面开始提问时间。

**学生：您刚才在讨论自旋极化电流，但是您如何把它和解决摩尔定律的问题联系在一起？**

**张教授：**这是个非常好的问题。很多材料都有强自旋—轨道耦合，比如，砷化镓这种非常普遍的材料。首先，在拓扑绝缘体中，电子是自旋—轨道耦合的，但是在很大程度上电子电流只在系统的边界运动。所以如果有一个三维的材料，边界就会是二维的；而二维材料的边界就是一维的。它看起来就很像高速公路的单向车道，因此如果你有个方形的材料，在右手边的向前运动，左手边的向后运动。

所以就有两种不同的可研究状态，一种叫做量子自旋霍尔效应，另一种是量子霍尔效应。量子霍尔效应最先是在低温强磁场中被观察到的，但是如果有自旋—轨道耦合和磁性，就产生了量子反常霍尔效应。所以这是最接近高速公路系统的推论。总体来说，就是被磁化选择，所以对于电子来说，在右手边的向前运动，左手边的向后运动。如果没有磁场，就是个纯拓扑绝缘体，一个无磁性的拓扑绝缘体，当存在这个自旋极化状态时，自旋向上的电子可能是遵循一套交通规则，自旋向下的电子可能遵循另一套规则，这就好像自旋向上是新加坡，向下是中国。两地有两种不同的交通规则，这就是为什么他们可以在街道上同侧行驶而不相撞的最根本原因。

可能我可以对在现场的同学们做一个问卷调查，在你们学习量子力学的时候，对你们来说哪个知识点是最难以理解的、最神奇的？Feynman

曾经说过，第一次学量子力学就能明白的人一定在某种程度上是个白痴。这是有一定道理的。量子力学一定是非常难以理解的，对吧？像海森堡测不准原理等等，但是还有哪些？量子力学里有很多让人觉得匪夷所思的理论吧？

**学生们：叠加状态、量子纠缠、波函数塌缩、全同粒子……**

**张教授：**好的，但是对于我来说，在我还是个学生的时候，量子力学里最让我困惑的，是个非常不符合常理的现象：一个带有二分之一自旋的电子，把它旋转 $2\pi$ 的角度，它的波函数并没有恢复到原来的状态，它增加了一个负号。这个对于我来说就是“那个”最神奇的问题。事实证明，就是这个让人费解的负号，避免了在同侧行驶的两个电子彼此相撞。如果它们相撞，或者因撞到东西而试图回转，那就总是有两种不同的方式来回转，而它们在电子自旋位移上的差距是 $2\pi$ 个角度，而这导致了一个负号的产生。如果它们被向后散射，就会导致破坏性的干涉。因为在单行道的一侧只有自旋向上的可以向前移动，自旋向下的可以向后移动，如果需要移动回去，总是有个负号伴随着。所以这些事实让人们了解为什么拓扑绝缘体和一些量子物理的基础定律相关。

**学生：既然 $720^\circ$ 的旋转和麦比乌斯带的拓扑结构有关，那么拓扑绝缘体理论的提出是否对于量子力学的基础有所影响呢？**

**张教授：**非常好的问题！我不清楚在场同学们的量子力学学到了什么程度，大家听过量子力学中一个叫做克拉默斯定理(Kramers Theorem)么？拓扑绝缘体的发现也和这个量子力学的基础理论相关。克拉默斯理论描述一个时间可逆的不变量系统，对于一个半自旋粒子，它的能级总是必须构成偶极子。在拓扑绝缘体中，导带，价带，甚至在常见的绝缘体中，都可能存在一些表面态，可能是来自于导带，而又回归导带；或者来自价带，又回归价带的。事实上，在今天的半

导体材料中，我们已经开始应用这种表面态，我们试图使用电场来诱发这种表面态，但是它们总是从导带来，再回去导带；或者从价带来再回去价带。拓扑绝缘体的不同点在于，这些表面态连接了导带和价带，但是如果它们相连了，它们就会在一点交叉，而这一点就是一个时间可逆的不变量点。同时克拉默斯定理禁止避免彼此交叉。如果它们不彼此交叉就会返回原点，亦即，导带回归导带，价带回归价带。因为克拉默斯定理说它们必须交叉，这就是这个理论的基础。而克拉默斯定理的产生正是因为当半自旋粒子旋转 $2\pi$ 的角度时，就会有一个负号产生。在微观世界，我们是可以进行时间可逆的操作的，比如我们播放一个电影，我只需要把电影倒带，在微观世界，如果有时间可逆对称的话，那么你反转时间轴，过去就会变成未来，未来变成过去。但是如果你如此往复两次，过去变为未来，然后这个未来又被变回过去，结果就是没有变化。所以在微观世界，时间被反演两次，就好像什么都没有发生。不过对于微观电子世界，你对于电子自旋做时间反演的操作，那么时间反演改变了自旋方向，因为自旋如同角动量，角动量是 $\mathbf{r} \times \mathbf{p}$ ， $\mathbf{r}$ 是不变的，以及相对时间可逆的，而 $\mathbf{p}$ 有相对时间的导数，所以就是 $\mathbf{r}$ 和时间导数。所以自旋是 $\mathbf{r}$ 在时间可逆，我们发现反向的时间轴，自旋必须转为相反的方向。如果我把时间轴反转一次，自旋向上变成自旋向下。如果我再次反转它，自旋向下变为自旋向上。所以如果自旋可以像微观世界的小箭头一样运作，那就好像我们什么都没有做。可是对于电子自旋来说，它恰好被旋转了 $2\pi$ 的角度，这样就有一个负号。所以对于电子自旋来说，当进行两次时间反演的操作之后，相对于初始态，终结态就会多一个负号，这就是克拉默斯定理的原因。所以这些理论和观点都是有着意义深远的联系，首次接触量子力学的人很难体会到其中深意的。

**Prof. Peter Preiser(杨振宁奖学金项目主任):** 可能我来问一个没有那么技术性的问题，因为不是在场的每一个人都是量子力学的专家，我是

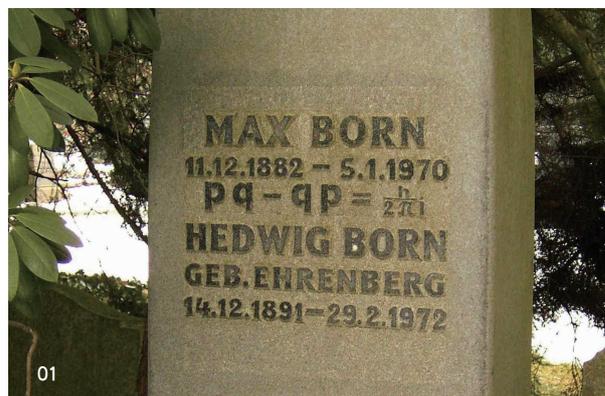
**一名生物学家，但是我认为在场的很多人都在准备毕业，对于本科生来说，其中一个挑战就是，他们该继续报读博士课程么？未来将会怎样？基础科学的未来会是怎样？你的建议是什么？**

**张教授:** 我认为每个人都经历过类似的挣扎，我住在硅谷，很多不是我们下的斯坦福的学生，都有着完全不同的人生追求，他们的奋斗目标是成为下一个谷歌的创始人，当然这也是个非常宏伟的志向。在我是学生的時候，因为历史的原因，我是在德国接受的本科教育，我是通过中国官方的留学生交换计划到德国学习的。那时候是20世纪80年代，我知道如果我学成回国，在国内是没有什么机会的，因为国内当时基本没有什么基础物理的研究的项目。很多我的同学都转行学习了更加实用的学科，比如电子工程，或者是一些更加有实际应用的工程专业，从而可以通过制造仪器以更加直接和身体力行的方式去改变世界。所以当时在这个问题上，我还是非常纠结的。所以那个暑假，因为是第一次去德国，我想环游德国，可是因为当时的经济条件所限，我只能沿着德国的高速公路搭便车旅行，这个经历也给了我对于德国的高速公路系统(autobahn)最直接的感受。出于自己的兴趣和童年经历，我对欧洲的历史、文化、艺术以及建筑都有所涉猎。所以每当我旅行到一个城市的时候，我总是非常欣喜，因为了解城市的历史，而且可以欣赏当地的建筑、艺术和博物馆等历史遗迹。

但是当我结束了几乎所有的旅程的时候，一个地方对我的人生追求有了决定性的影响，那就是哥廷根。它就是量子力学的发源地，我还记得那里有个啤酒大厅，很多物理学家都会去那里讨论，在这个啤酒大厅的桌子上，麦克斯·波恩在一片餐巾纸上写下 $|\psi(x)|^2$ 的方程式。所以在我的印象里，这个地方是个圣地，可是更加神圣的不是城市广场，或者是啤酒大厅，而是一个哥廷根的墓地。墓地是个沉思生命的意义的好地方。墓地是非常适合思考人生的目标和生命的意义。当你身处一个埋葬了很多著名的数学家和物理学家的墓地，哥廷根大学是个德国历史最悠久的大

学，很多著名的物理和数学家都在这里学习和工作过。高斯(Carl Friedrich Gauss)曾经在这里工作并且长眠于此，他的学生 Bernhard Riemann 也曾经是哥廷根大学的一名教授，Otto Hahn 是这里的教授，Max Born 和 Werner Heisenberg 也曾经在这里工作和生活过。所以，在这片墓地，许多著名的物理学家和数学家的墓碑毗邻而立。墓碑上的墓文都非常简单，只有名字和生卒年份，这些和别的墓碑没有什么不同，其实很多其他的墓碑反而更多装饰，他们的都只有很小的一个墓碑，但是上面总是有一个方程式或者是能概括最具有代表性的他们的科研成果。我还记得 David Hilbert 的墓碑，因为他的成就太多，比如他的 23 个数学难题，这些是不可能都记载在他的墓碑上，所以墓碑只引用了他的一句名言，“WIR MUSSEN WISSEN, WIR WERDEN WISSEN”，翻译过来就是“我们必须了解，我们必会了解”。这个墓志铭体现了他的坚定的决心，可能他指的就是他提出的 23 个难题，我们必须知道答案。以中国人的说法，就是“死不瞑目”，因为他去世的时候虽然他的 23 个难题有一部分已经被解决了，但是很多还没有答案，特别是他最喜欢的“黎曼假说”，至今未解。麦克斯·波恩的墓碑上刻的是测不准原理( $pq - qp = h/2\pi i$ )。所以，这些都让我们感受到生命的意义是留下一些可以永久保存的信息。在人类在这个星球存在之前，生物体在血肉之躯泯灭之后，唯一可以留下足迹的方法就是通过它们的基因。基因，按照我们今天的观点，其实也是一种信息，所以在生物范畴，总是可行的。不过从人类文明的角度来说，除了繁殖，即通过我们遗传给我们子女的基因之外，我们还有另一种方式来传承信息，与人类文明共存。人去世之后，经过世代繁衍，可能很难再辨认出他们的基因，不过他们创造的这条信息，这个知识，将会伴随人类文明直至末日。

所以，我最喜欢问我学生的一个问题是你如果要去诺亚方舟，而你只可以带一张纸来总结人类文明的全部知识，会是拿破仑的名字么？还是



(01) 波恩教授的墓碑；(02) 希尔伯特教授的墓碑

你会带着  $E = mc^2$ ，这条体现了人类文明最高成就的方程？这个问题去年问非常好，因为 2012 年是被某些人预言的世界末日。我觉得对我来说，这个答案是非常明确的，当然是应该带着这个方程去诺亚方舟。所以在哥廷根的这个墓地，我领悟到了人生重要的一课：人生最高的追求应该是留下你创造的一些知识。从此以后，我就决心做一个物理学家，而不去考虑将来如何赚钱养活自己。但是当然，我想当今社会，还是有很多其他的方式来实现人生目标的，比如成为另一个谷歌的创始人也是件很酷的事情。

**学生：**我们当中有些人可能不知道，张教授15岁初中毕业时跳过整个高中阶段直接考入复旦大学，而且在他刚过而立之年的时候就已经成为斯坦福大学的终生教授。张教授，您在进行您的研究的过程中，曾经经历过什么失败么？如果有，您是怎么克服的？

**张教授：**我想在你进行科学研究的时候，绝大多数的时间你不可能听到“谢耳朵”对着四千万的观众讲你的研究成果。你可能经常觉得你走入了一个死胡同，或者你没有任何进展。在从事拓扑绝缘体的研究之前，我其实在做高温超导方面的研究。

爱因斯坦、狄拉克和杨振宁这三种独特的人格都完美地体现出了一种风格，我认为这种风格是非常宝贵的。他们都有着最坚定的信念，那就是物理的最基本法则应该是被数学的美感所激发。比如，爱因斯坦认为黎曼几何非常适合被用来表述时空概念。去年(2012年)，我非常荣幸地获得了狄拉克奖章，狄拉克一直以来都是我心目中的英雄。所以，大家认为他对物理最大的贡献是什么？狄拉克方程？或者说是对正电子的预言？有时候，当我和一些非物理背景的人聊到狄拉克的时候，很多人都不清楚他是谁。但是当我提到



现场同学提问

《天使与魔鬼》的时候，每个人都知道。(大家有看过这部 Dan Brown 的小说或者由小说改编的电影么?) 在小说中，那枚要炸毁梵蒂冈的炸弹，就是个反物质炸弹，这个炸弹具有着人类可以想象出的最高的能量密度。狄拉克就是反物质的发现者，因为一次他需要对一个公式开平方根，然后他忽然记起，按照高中所学的知识，对4进行开根号，会得到2和-2。所以你总会得到两个根。从此，他联想到所有的物质都应该有两种不同的状态，或者是物质的正能量状态，或者是负状态，亦即反物质。当然，杨振宁也是另外一个很好实例，他只是思考麦克斯韦尔方程的结构以及如何在数学上表达它，从阿贝尔变换群到非阿贝尔的变换，就发现了杨-米耳理论。而这个理论包含了自然界四种基础力中的两种。所以，这种思维方式或者逻辑对我一直有很深远的影响和启发，可惜它不总是能被成功地运用在科学研究中。

我曾经试图把这种逻辑应用到一个被认为是凝聚态物理中最重要的难题之一：高温超导的机理。所以我就用对称的美感想出一个机理，高温超导体是从它们的母态发展出来的，而这其实几乎是与预期相反的。如果要发现超导体，你应该是从很好的导体开始，但是当贝德纳兹和马勒(Bednorz and Muller)发现超导体的时候，他们是从最差的导体开始的：一块绝缘陶瓷。他们对它进行了加工，然后那块陶瓷就变成了超导体。这种经验观察总是让我感到非常感慨。所以我认为这种反铁磁的绝缘体和超导体其实是同一种物质，被一种由我命名为SO(5)的对称性统一起来。我是在1997年首次提出这个理论的。开始我非常幸运，在当时这是个被公认为非常重要的领域，很多资深的理论物理学家都涉足其中。虽然我当时已经取得了正教授职位，可是大家还是觉得我非常年轻。我提出了这个让我深深为之着迷的理论，而且我当时非常确定我已经解决了高温超导的全部难题。所以我写了一篇文章，题目为“A unified theory based on SO(5) symmetry of superconductivity and antiferromagnetism”而且非常冒险地把这篇文章投到了*Science* (《科学》)杂

志。那个时候，每个人都告诉我：“首晟，你绝对是没有机会的，任何一个理论物理的审稿人都会立刻拒绝这篇文章的，他们怎么能容忍竞争？”况且，在凝聚态物理中，人们不认同杨振宁、狄拉克和爱因斯坦的这种逻辑会真的成功，因为他们没有看到过先例。在当时，尽管每个人都说是会被立刻拒稿，可是《科学》杂志还是决定把那篇文章送出去给审稿人。这个举动本身已经非常难得了，更令人吃惊的是，我的文章在一个月之内就立刻被接收了，只被要求有些细微改动。(Shou-Cheng Zhang, *Science*, 1997, 275: 1089)。长达五页的纯理论文章，对于《科学》杂志来说已经是非常罕见的了，而凝聚态物理方向的如此长度的理论文章之前更是从来没有在《科学》杂志上发表过。恰恰是在我文章发表之后，大范围的攻击开始了。所有资深的理论物理学家开始攻击我的理论。其实一般情况下，在这个领域你只会得到两种反应：人们或者说这个不对，或者说“我之前做过这个东西”。所以，我想那时候大概是70%的人不认同我的观点，另外的30%认为这是他们之前就做过的东西。其实这个理论的确还是有所成就，我想这篇文章到目前为止已经被引用了700多次，而且也有人把他们的研究建立在我的理论之上。但是我很清楚这个理论在短期内是不可能被广泛接受的。我真的是被我导师的风格所影响，同时也由衷希望能用这种风格来进行研究，我认为理论物理的研究应该是这样开展的：当你构思出美丽的数学理念之后，大自然会在某种程度上认可这种美感。因为意识到我的理论无法被广泛接受，我的确消沉了几年。在那个时候，我可以有两种反应，一种就是我可以继续钻研这个课题，并争取世人的广泛认同，这样做也是非常理想的选择。在基础物理学领域中，爱因斯坦的相对论、杨-米尔斯理论、奇偶性、狄拉克的方程等等非常多的实例已经证明：人们构思了一个美丽的概念之后，大自然立刻就认同了这种美感。但是在凝聚态物理领域，这种情形从未发生过。我努力尝试过了，但是却不是很成功。在当时我是非常纠结的，我想我的

确有很多其他的机会，不过如果我继续坚持物理研究，我最感兴趣的还是用这种风格来研究物理。后来我尝试了其他的一些方向，最终我发现了拓扑绝缘体，而且大家应该都能够认同，拓扑绝缘体的研究其实就是狄拉克风格的完美体现。

**学生：在量子场物理领域，特别是粒子物理领域，学者们提出过很多理论。在上世纪七八十年代非常流行的就是自举理论，可是后来出现的量子色动力学取代了它。量子色动力学是现在最热门的理论，但是是否有可能，由于太多东西需要被解释，量子色动力学和自举理论在不同层面来讲，其实都是正确的？或者说量子色动力学只是能解释一部分事实。**

**张教授：**首先，自举(bootstrapping)理论不是错误的理论，它只是不够强大。很多非常聪明的人在这个领域钻研了很多年，而且这个理论也有自己的数学美感，这个理论有很多复杂的东西。我特别喜欢一个叫做“核民主”的理念，它听起来很深奥。我认为这个理论问题主要在于不够强大。

量子色动力学也不是一个被完全理解的理论。2000年美国克雷数学研究所设定的千禧年七大猜想就包括了黎曼假设和杨-米尔斯理论。夸克的不可见性还无法从数学上解释。我们有一些想法，但是无法确认。因为杨-米尔斯理论是关于强相互作用，我们可以解释说在很高很高的能级，耦合变弱。但是我们无法解释在低能量状态，强耦合的情况。所以，很多人一直在研究这个数学难题，新观点不断涌现。即使我们无法解决杨-米尔斯理论，或多或少可以从数学的角度解决这个理论的超对称版本，而且是绝对具有美感的。Seiberg和Witten已经找到部分答案。很多关于二元性、磁单极子的想法就可以被验证。还有一个问题，就是这些理论无法被分析式地解决。很多人试图把这些问题输入电脑来解决，却至今还没有得到答案。IBM的华生超级计算机就是被杨-米尔斯难题催生的，而且他们还搭建了一台量子色动力学机器来试图解决这个问题。我相信人们接受这个基础理论是因为你可以计算它，而从电

脑计算得出的结果不是可以感知的。

**学生：张教授您好，您曾经提到过拓扑绝缘体的工业化至少还要五年的时间，您有想过参与一些工程类或者是一些公司的研发么？**

**张教授：**对，按照美国的传统，防御高等研究项目机构(DARPA)的项目很多都是会成功地被实体化成一个公司。美国的科研经费审查机构有能源部、国家科学基金，这两个机构基本上不管有没有应用的可能性，只要科学上有价值就可以，但是DARPA如果投资的话，会优先考虑那些未来有一定商业价值的项目。DARPA愿意在私有资产进入之前先承担这个风险，可能再做一两年，如果真的能够看到这个项目的应用前景，我想私有资产在这个时候应该会开始接手。

**学生：如果拓扑绝缘体真的能够工业化的话，可能会导致半导体和信息产业的重新洗牌，但是您会不会觉得拓扑绝缘体的原材料会是产品工业化的一个限制？**

**张教授：**的确，现在找到的原材料都是比较稀有的那种，但是我们在2008年有一个理论上的预言，今年也被一位华人教授杜瑞瑞所证实。这个材料叫砷化铟/锑化镓(InAs/GaSb)，这个材料在半导体工业还是很普遍的。所以可能这五年之内要做的事情还是很多的，但是我们可以平行进行。我们现有的拓扑绝缘体材料，可能需要有一些特殊的加工才能应用到实际生产中，但是我们可以先把它得原理搞清楚。与此同时也要去开发一些新材料，希望这些材料能够更加常规，最好是能够和现有的半导体技术结合起来。

**学生：现在的年轻人在选择研究理论物理的时候需要下很大的决心。您觉得他们需要具备什么样的特质才适合理论物理方面的研究呢？**

**张教授：**我觉得还是要感到它的美。做理论研究一般有两种情况，一种情况是，你的课题很多人都在做，你跟大家交流的时候也很热闹，但是这个课题的研究价值就不那么大，因为这个框

架肯定是别人先创造的。另一种情况是，你需要自己创造一个框架，那么你一定非常孤独。所以这种情况下要有一种驱动力，要有一种信念，要有一种信仰，而这些的确也需要有某种特质的人才可以做到。但是我想对于学生来说，可以从小的成果积累到大的成功。在学习的过程中，我想一个好的理论物理的学生应该很容易被一些大师的事迹所激励。比如说，看到狄拉克的故事，看到杨振宁的故事，他会觉得备受鼓舞，这些都会影响他日后的研究风格。所以我们今天有这样的机会可以与杨振宁奖学金得主互动是非常好的，因为这些大师也在用他们的精神指导我们。

**学生：知识产业等工业要有质变性的发展是必须依靠理论研究的支撑的，所以保证理论物理的生源是非常重要的，您觉得会有越来越多的学生投身理论物理的研究么？**

**张教授：**对，我想这个肯定可以保证，因为大家整个社会的财富总是在增加。比如说我们在美国可以看到这个现象：第一辈我们国内出来的人，可能因为考虑要先能站稳脚跟，所以往往选择做工程等一些比较实用的专业。但是他们孩子的选择就没有这方面的局限，因为第二代不需要为生活担心。所以，我想可能会有越来越多的人会选择进行理论物理的研究。

**学生：您曾经提到过，您的启蒙教育是艺术、哲学、历史等社会科学，您觉得这些经历对您日后的研究有什么影响么？**

**张教授：**的确有非常重大的影响。比如说历史，我们不要讲科学史，就讲我们通常的历史，欧洲的历史，中国的历史，你说这些对于研究理论物理有什么帮助？表面看上去并没有太多关联。但是你看历史的话你就会想到一个问题，就是什么东西能够留下来，什么东西不能留下来。其实在从事科学研究方面，当到达了某种技术层面，大家的专业技能都是旗鼓相当的。比如说，你做理论物理，你的推导能力比较好，你做实验物理，你操作仪器的能力比较好。到了一定的层

次，这种厉害的人已经多如牛毛。但是为什么最终有些人能够更上一层楼，这个决定因素其实超出了物理的知识范畴，就是需要具有一种品位，因为大家能力都很接近，都在竞争，面前比如说都摆着十条路，然后我选择这条路，你选择另外一条。最后的结果一般是只有一个人成功，而且往往从技术层面上说，最后成功的这个人并不一定那么厉害，他成功是因为他选择了对的方向。所以从这个观点来看的话，其实科研和艺术就非常像，就是一种品味；这跟历史也比较像，就好像我们在历史关头，到底要做怎么样的决定。所

以这些看得多了，对于你在这个选择关头，可能会有些帮助。可能这些选择看似偶然，其实是一个知识长期积累的结果。我的小学和初中时期刚好赶上“文革”，所以从小我就经常在自己家里的阁楼上面读书，都是一些关于欧洲哲学史、欧洲艺术史之类的书籍。国内那时科学方面的书籍也不是很多，虽然我的父亲是学工程专业的，但是我的伯父们都是学习人文的，而他们留下的书都是关于哲学、艺术、美术之类的，所以我的启蒙教育反而是在人文科学方面。其实直到现在，我还是对这些人文的东西非常感兴趣。

读者和编者

## 欢迎订阅2014年 《现代物理知识》杂志

《现代物理知识》的前身是创刊于1976年的《高能物理》科普杂志。该杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的一份中、高级科普性期刊。

《现代物理知识》杂志，邀请科研一线的物理学家，以通俗易懂的语言及图文并茂的形式，介绍现代物理学知识和物理学前沿动态。读者对象颇为广泛，有科学工作者、教育工作者、科学管理干部、大学生、中学生和其他物理学爱好者。《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目。

定价：9元/期，全年6期共54元，如汇款到编辑部，可每期再加3元挂号费(全年18元)，避免平邮丢失。

### 订阅方式：

1. 邮局订阅：邮发代号：2-824
2. 汇款到编辑部：

地址：

北京市玉泉路19号乙高能所

收款人：

《现代物理知识》编辑部

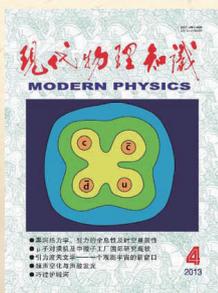
邮编：100049

编辑部联系方式：

电话：010-88236284

Email: mp@ihp.ac.cn

网址: http://mp.ihep.ac.cn



## 订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕

—<物理>四十年集萃》

2012年《物理》创刊40周年，为答谢广大读者长期以来的关爱和支持，《物理》编辑部特推出优惠订阅活动：向编辑部连续订阅两年(2014—2015年)《物理》杂志的订户，将免费获得《岁月留痕—<物理>四十年集萃》一本(该书收录了从1972年到2012年在《物理》各个栏目发表的四十篇文章，476页精美印刷，定价68元，值得收藏)。

欢迎各位读者订阅《物理》(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

### 订阅方式

#### (1) 邮局汇款

地址：100190，

北京603信箱

《物理》编辑部收

#### (2) 银行汇款

开户行：农行北京科院南路支行

户名：中国科学院物理研究所

帐号：11250101040005699

(银行汇款请注明“《物理》编辑部”)

咨询电话：(010)82649266；82649277

Email: physics@iphy.ac.cn

