

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 141 次

学部工作局科学普及与学术处
《中国科学》杂志社 编报

2023 年 11 月 17 日

“室温超导”论坛综述

一、背景

超导具有零电阻和完全抗磁两种物理特性，是一种宏观量子效应，拥有广阔的应用前景。室温超导是最具挑战的凝聚态物理科学难题之一，而室温超导材料的出现必将带来新一轮科技革命，在国防、能源、交通、医疗、信息等领域实现颠覆性应用。

自从 1986 年高温铜基超导体被发现以来，学术界一直在努力探索更高温度的超导材料，期待能最终实现室温下的超导电性。随着近年来铁基高温超导体以及高压下富氢材料中高温超导电性的发现，人类距离实现室温超导已经不再是“天方夜谭”，突破室温超导已经来到了一个关键的历史时刻。

举办此次“室温超导”论坛，目的在于凝聚力量，研讨突破室温超导的科学思路和可能方案，针对室温超导（或超过液氮温区的常压高温超导体体系）的发现和应⽤，形成在国家层面上的政策和措施建议（如设立专项、稳定支持团队研究等），争取在探索室温超导的研究方面取得重大突破，使我国率先占领超导基础和应用领域的制高点。

二、论坛概况

2023年6月17~18日，中国科学院学部“室温超导”科学与技术前沿论坛在安徽省黄山市举办。本次论坛由中国科学院学部主办，中国科学院数学物理学部、技术科学部、学部学术与出版工作委员会承办，中国科学技术大学、南方科技大学、中国科学院物理研究所、《中国科学》杂志社协办。中国科学院院士陈仙辉、向涛和薛其坤担任论坛执行主席。46位来自超导研究领域不同方向的院士、专家和活跃在科研一线的优秀青年学者受邀参加论坛。论坛围绕“室温超导”这一主题，共设置了“高压下的室温超导”“铜基、铁基高温超导体对室温超导的启示”“室温超导新机制和新材料探索的思考”三个议题，23位专家从不同的研究方向作了专题学术报告，来自实验、材料、理论和计算领域的院士专家畅所欲言，深入讨论了当前室温超导研究所面临的挑战和机遇。

三、论坛重点关注的议题及报告

议题 1: 高压下的室温超导

北京高压科学研究中心毛河光院士围绕“高压下室温超导探索”进行了全面的概述，报告指出：近20年来在高压下发现许多前所未有的新型富氢超导材料，其超导温度 (T_c) 屡创新高接近室温。这些令人惊喜的发现不仅为高压凝聚态物理带来了理论与实验研究的新的聚焦，甚至也引发了更广阔的科学界乃至社会大众的关注和讨论。此刻正宜回顾历程，归结教训，展望未来。新方向源于2003年美国著名物理学家 Neil Ashcroft 探索超高压金属氢开辟的蹊径：他认为富氢化合物相当于在对氢进行掺杂，应该能降低氢金属化所需的压力；而氢的质量极低声子频率极高，其金属可能具有高温超导电性。后续的实验虽然发现 SiH_4 在高压下可以超导，但 T_c 并不高。直到2015年德国马普所发现硫化氢的体系在200 GPa 压力下 T_c 达到 205 K，才打破铜氧化物高温超导体保持了20年的高压 $T_c = 164 \text{ K}$ 记录。理论和实验真正

的结合，始于 2012 年吉林大学马琰铭组理论计算，他们认识到氢的笼状结构是高温超导的关键。2019 年马普所用实验证明具有氢笼状结构的 LaH_{10} 在 170 GPa 的 T_c 可以达到 250 K。一时多种氢笼状结构的富氢化合物在超高压下被发现具有高温超导现象，超导和高压领域立见沸腾。在追求室温超导的热潮之下，也产生了一些波折。2020 年 Ranga Dias 研究组宣称碳硫氢化合物在 267 GPa 下 T_c 达到 288 K，但原始数据经不起严谨的分析质疑，两年后被 *Nature* 撤稿。2023 年该组又宣称 Lu-N-H 体系在 1 GPa 时就能有 297 K 超导，但两个月内就被国内外多个实验组的实验否定了。这些波折更强化了高压高温超导实验证据的严格标准。至今所有富氢高温超导都需要足够大的压力把氢分子变成笼状结构的氢原子，无法在常压保存。发展金刚石包裹体技术，将是未来实现在常压环境下保持高压超导性的可能途径。

吉林大学马琰铭教授结合自己的研究，以“高压下氢笼合物结构的氢基超导体”为题进行了详细的介绍，报告指出：近年来，高压强极端条件下的富氢材料已经成为高温超导体研究的热点目标材料体系。截至目前，该领域相关研究取得了一系列重要进展，尤为引人瞩目的是人们所发现的一大类以 CaH_6 、 YH_6 、 YH_9 和 LaH_{10} 等为代表的氢笼合物结构的氢基超导体，其中 LaH_{10} 的超导温度接近 260 K，刷新了已知超导体的超导温度纪录，相关研究工作燃起了人们在高压下富氢化合物中发现室温超导体的希望。马琰铭教授以 2012 年首次在国际上提出高压下氢笼合物结构的富氢化合物 CaH_6 的理论工作为基础，详细介绍了近期高压下氢笼合物结构的氢基超导体的相关实验和理论研究进展和未来展望。

中国科学院物理研究所程金光研究员对“富氢超导材料：高压实验进展”作了全面详实的介绍，报告指出：自 1911 年超导电性被发现以来，关于超导的研究已历经百余年仍方兴未艾，室温超导依然是全球科学家孜孜以求的目标。在理论预测的驱动和指引下，近年来人们

在超过百万大气压的超高压下在实验上合成并发现了 H_3S 和 LaH_{10} 等为代表的一系列富氢高温超导材料,不断刷新着超导临界温度的记录,为实现室温超导带来了希望,从而吸引了广泛关注。在此研究背景下,程金光研究员概述了富氢化合物高温超导材料的最新研究进展,指出该领域中存在的问题与挑战,包括:(1)样品非单相、不均匀;(2)无法直接确定晶体结构和化学组分;(3)超导关键证据仍欠缺;(4)微观性质表征不足等,以及可能的研究思路,并提出该领域亟需解决的关键科学问题:(1)如何降低富氢材料的合成和稳定压强?(2)能否在近常压条件下获得富氢高温超导材料?

议题 2: 铜基、铁基高温超导体对室温超导的启示

中国科学院大学张富春教授以“*Theory for high T_c superconducting cuprate*”为题对高温超导的理论进行了全面详实的概述,从掺杂莫特绝缘体的角度回顾对高温超导铜氧化物的理论理解,并认为方形晶格中的 t - J 模型包含了高温超导铜氧化物的许多基本物理。最后,报告对最近支持上述理论模型的实验以及对模型基态的大型数值模拟分别进行了评论。张富春教授认为:(1)从母态出发,基于二维 t - J 或 Hubbard 模型的掺杂莫特绝缘体描述低能物理是合理的;(2) d 波配对是来自于自旋-自旋耦合部分;(3)尚不清楚单独的 t - J 模型是否足以满足 d 波配对的基态,格点间的电荷相互作用或其他效应可能有利于稳定超导态;(4)对于室温超导,我们需要更大的 J 才能有更高的 T_c 。

中国科学院物理研究所向涛院士以“*Hunting high- T_c superconductors by metallizing sigma-bonding electrons*”为题对理解高温超导提出了独特的视角,报告指出: σ 键合电子具有大的结合能,并通过强的电子-声子相互作用而稳定。如果可以通过化学掺杂或其他增加电荷效应将 σ 能带提升到费米能级,那么强的结合能就会释放出来,但残余的相互作用仍然很强。这可能导致强烈的超导配对相互作用。他认为,这是一个普遍的物理图像,适用于迄今为止发现的所有高温超导体。

清华大学翁征宇教授对 “Why T_c is so low in the cuprate?” 作了深入的阐述，报告指出：高温超导机理是凝聚态物理领域的一个重大挑战。其核心涉及强关联效应，即电子多体波函数在强相互作用下如何自发组织成一个新奇超导态而不需要电声子作用的帮助。这是高温超导机理研究的圣杯。翁征宇教授从掺杂莫特绝缘体出发来描绘一个完整自洽的图像和理解供讨论。几个基本问题包括如何从半满的反铁磁相通过掺杂到达一个非费米正常态；其如何自发展现超导失稳而不需要外部晶格振动的辅助；当朗道费米液体准粒子不再是主导元激发时，建立其上的 BCS 常超导波函数如何作出根本的修改；什么是限制 T_c 的主要原因以及如何提高它？

中国科学院物理研究所胡江平研究员以 “探索高温超导体的一点思考” 为题进行了报告，对如何寻找高温常规超导体和非常规超导体做一些理论思考。胡江平研究员首先提出了超导的一些基本理论问题，包括：（1）超导转变温度的问题；（2）常规和非常规超导区分的问题；（3）超导体系的问题；（4）非常规超导机理的问题。随后，对基于铜基和铁基非常规超导体提出的非常规高温超导体的电子结构基因进行了总结和展望。报告最后，胡江平研究员对实现室温超导提出了两点看法：（1）提高能量尺度；（2）优化电子环境；并对未来的探索方向提供了一些建议：（1）高压（提高能量尺度）；（2）新结构；（3）界面调控（二维性）；（4）未知的可能性。

中国科学院物理研究所周兴江研究员对 “氧化物超导体高 T_c 的电子结构起源” 进行了详细的阐述，报告首先简要总结了铜氧化物超导体中和超导温度 T_c 相关的经验规律和关键参数，然后介绍了对铜氧化物超导体电子结构和超导机理实验研究的近期进展，最后介绍了周兴江研究员课题组对铜氧化物超导体中多体相互作用和层间耦合研究的结果。

清华大学王亚愚教授以 “Emergence and disappearance of

superconductivity in cuprates”为题对最近在高温超导体中取得的研究进展进行了介绍，报告指出：关于铜酸盐中高 T_c 超导机制的少数共识之一是母体化合物是莫特绝缘体，当掺杂的空穴抑制反铁磁秩序时，超导性就会出现。然而，超导性在空穴过多的过掺杂区域消失了。为了阐明超导性出现和消失的微观过程，王亚愚教授课题组对铜氧化物超导体原子级电子结构进行了随掺杂变化的扫描隧道显微镜研究。他们的结果首先展示了母莫特绝缘体中电荷转移能隙的观察结果，以及它与最高转变温度的反相关性。这意味着超交换相互作用在库珀配对中起着核心作用。当百分之几的空穴分散到莫特绝缘体中时，它们会自组装成由大小约为 $4a_0$ 的块状物组成的棋盘小岛。即使在绝缘样品中，他们也观察到从莫特绝缘体相接近棋盘岛时超导能隙的平滑出现，以及 Octet 模型准粒子干涉图案。他们发现，每个棋盘格包含大约两个空穴，并且呈现出对超导性能有强烈影响的条纹内部图案。在绝缘体到超导体的过渡过程中，局部谱学在定性上保持不变，而准粒子干涉则变为长程的。随着掺杂量的进一步增加，准粒子在反节点区的强散射破坏了超导配对，这是超导电性消失的驱动力。这些结果为理解铜基高温超导体中超导性的出现和消失提供了重要的新线索。

中国科学技术大学封东来院士对“从电子结构看铁基高温超导的实验图像”作了全面详实的介绍，报告基于角分辨光电子能谱和扫描隧道谱学对电子结构的测量，从以下几个方面介绍了对铁基超导强耦合实验图像的认识：（1）费米面构型和配对对称性；（2）电子关联在多种铁基超导能带结构和普适相图中起的关键作用；（3）作为超导配对媒介的自旋涨落与竞争序的关联。同时封东来院士也探讨了从 FeSe/氧化物界面超导研究中得到的有关超导机制的启发，铁基与铜基高温超导的相关性，以及目前一些未解决的问题。最后给出一些展望和建议，包括：（1）实现常压的室温超导可能需从物理压力转换到化学压力；（2）在体材料中能否确立协作型超导机理？（3）基于四

代光源的非弹性硬 X 射线散射，能够准确测量声子软化等，帮助理解高压下近室温超导的机理。

南京大学闻海虎教授对“从铜氧化物和铁基超导体的异同点浅谈高温超导体探索”进行了详细的阐述，报告指出：常压下的高温超导，甚至室温超导是人类梦寐以求的科学目标。闻海虎教授从铜氧化物和铁基超导体的共性和差异浅谈了高温超导探索问题。首先，铜氧化物和铁基超导都是基于外层具有 3d 轨道电子的过渡金属，其电子行为表现出局域和巡游的二重性；前者往往导致磁矩和磁相互作用的产生，后者在费米能处形成有效态密度。基于这种图像，这些材料的母体一般都具有低磁矩反铁磁相，依赖强关联效应的强弱，会出现不同的相图和费米面形态。其超导配对可能主要由磁相互作用产生，往往会导致强配对和低超流密度的结果。因此局域短程配对和较低的相位刚度是其特色。铁基超导体中的强耦合配对势和浅带效应就充分反映了这种特性。在这种强关联图像下，电子的准粒子属性在多大程度上得以保持仍然值得探究，但是声子和电-声相互作用又是绕不开的因素，有证据表明会帮助提高电子的配对势。因此在关联过渡金属材料中寻找低磁矩反铁磁性和巡游性达到合适平衡的化合物也许是获得常压下高温超导的必要条件。

议题 3: 室温超导新机制和新材料探索的思考

南方科技大学薛其坤院士针对“二维/界面探索室温超导”进行了主题报告，报告首先介绍了半导体二维电子气产生的机制，并由此引入对高温铜基超导机理的重新思考，认为高温超导体中的载流子掺杂并不是发生在 CuO 面上，而是发生在 CuO 面与库电层形成的界面附近，由此提出高温超导可能是一种界面增强的 BCS 超导体。随后，薛其坤院士介绍了基于上述思想，他们在单层铟/铅超导体、铁硒单层薄膜超导的工作，并观察到 U 型的超导能隙。类似的 U 型超导能隙也在随后的铜基超导体实验中被观察到，这一发现对高温超导配对对称性

已有的理解提出了挑战。最后，薛其坤院士还介绍了他们在高温超导体相敏实验中取得的最新进展，观察到 S 波的实验证据。基于上述研究经验，薛其坤院士对未来探索室温超导提出了一些建议，并指出可以在一些德拜温度很高的衬底上（例如金刚石等）蒸镀超导材料，从而实现界面增强的高温超导。

上海交通大学贾金锋院士对“超导与界面”作了全面详实的介绍，报告指出：界面会引起很多新奇现象，与超导有关的界面更是这样。报告首先介绍 MoTe₂/STO 界面超导增强现象，接着介绍了 SnTe/Pb 界面超强的超导近邻效应，最后探讨了不同超导材料的近邻效应。报告最后总结几点意见：(1)界面 T_c 增强很困难(体系不多)；(2)1T'-MoTe₂/STO 界面增强超导，可能的拓扑超导；(3)超导界面非常复杂；(4)近邻效应与界面质量有关；(5)近邻效应与超导体态密度可能也有关；(6)超强的近邻效应起源？

北京大学谢心澄院士以“Recent development in spin superconductor”为题进行了专题报告，谢心澄院士首先介绍了他和合作者提出的自旋超导体（SSC）概念，它是电荷超导体的对应物。通过理论研究谢心澄院士证明了铁磁石墨烯中存在自旋超导体，其中自旋极化电子空穴激子起到了“库珀”对的作用。报告还进一步提出了 BCS 型理论和 Landau-Ginzburg 理论，并利用超自旋电流密度的“伦敦型方程”，证明了在空间变化电场作用下电子“迈斯纳效应”的存在。随后，介绍了他们研究的 SSC/正常导体/SSC 结以及预测的自旋电流约瑟夫森效应。最后，谢心澄院士介绍了关于自旋超导体最近的实验结果。

北京大学王楠林教授对“超导体非平衡态太赫兹光谱探测”作了全面详实的介绍，报告指出：超短激光脉冲和伴随发展的非平衡态光谱技术成为调控和探测量子材料物性的重要实验手段。在超导领域，该方面的发展推动和产生了两个令人关注的新兴研究前沿，即光诱导的可能的“瞬态高温超导”和超导体中 Higgs 集体激发模的探测。报

告结合王楠林教授研究组开展的工作介绍了“瞬态高温超导”的现状和挑战性问题。利用自主建设的近红外到中红外波段能量可调的强场脉冲激光泵浦-太赫兹探测实验系统，王楠林教授系统地研究了欠掺杂 YBCO、LBCO 等铜氧化物高温超导体非平衡态光学响应，报告讨论了：（1）实验所观察的现象是否可唯一解释为“瞬态超导”；（2）是否一定要求声子能量共振的激发才能观察到相同现象。结合最近开展的 ab 平面和 c 轴两个方向瞬态太赫兹响应，王楠林教授认为当前结果并不支持光诱导的“瞬态高温超导”。

上海交通大学丁洪教授对“铁基超导体：一个新的马约拉纳平台”作了全面详实的介绍，报告指出：固体材料和器件中的马约拉纳零能模因具有潜在的量子计算应用前景而引起了人们的巨大兴趣，过去的十年见证了寻找马约拉纳零能模的快速进展和重大挫折。最近铁基超导体因其具有相对高温和高纯度正在成为一种新的充满希望的马约拉纳平台。在报告中丁洪教授介绍了促成“铁马平台”的系列发现。丁洪教授在 Fe(Te, Se) 中利用角分辨光电子能谱观察到超导拓扑表面态，并利用扫描隧道显微镜在该材料的磁通涡旋中观察到较纯的马约拉纳零能模。丁洪教授观察到涡旋束缚态的半整数能级嬗移和近量子化的电导平台两个马约拉纳零能模的特征性质。还发现大多数铁基超导体都具有相似的拓扑能带。最后丁洪教授介绍了压力可以作为一个很好调控铁基超导体中马约拉纳零能模的手段。铁基超导体中固有的拓扑性质和涡旋中分立束缚态的大能隙（并且这些都可以被压力调控）为马约拉纳零能模的确认提供了令人信服的证据。

清华大学姚宏教授对“可能实现常压室温超导的电声子机制”作了全面详实的介绍，报告指出：在强关联量子材料中，电子-声子耦合（EPC）是一种普遍存在的强耦合现象。此外，越来越多的研究表明，EPC 对于理解物质的各种量子相，如铁基和铜酸盐高温超导电性是至关重要的。在报告中，姚宏教授介绍了 Su-Schrieffer-Heeger 型 EPC（有

时与电子-电子相互作用协同作用)在诱导物质的奇异量子相(如反铁磁长程有序和价键固体, d 波超导性)甚至在常压下可能的 s 波室温超导性方面发挥重要作用。姚宏教授主要讨论了在这一可能的 EPC 机制下的 s 波室温常压超导。

中国科学技术大学陈仙辉院士以“高温超导材料探索的思考”为题对高温超导材料探索和机理研究提出了自己的见解, 报告指出: 高温超导体的特征之一是具有二维的结构, 其二维结构单元是超导发生的关键, 决定了其物理性质。陈仙辉院士瞄准高温超导体, 从二维结构出发, 探讨了二维高温超导体的设计, 主要途径为: (1) 块体超导体功能单元的二维化; (2) 插层使超导体的二维化; (3) 不同功能材料异质结的超导二维电子气; (4) 人工制备不同二维高温超导单元的复合。最后, 陈仙辉院士浅谈了对铜基高温超导体的一些思考, 包括非费米液体行为在理解高温超导机理中的启示等。

浙江大学林海青院士以“有机超导体”为题进行了主题报告, 全面详实地介绍了他们在有机超导体方面的研究工作, 并讨论了铜氧化物高温超导机制及对室温超导的思考。报告从有机超导体的研究背景, 晶体结构及稳定性, 电子关联, 超导相及机理和新的有机超导体几个方面进行了系统的介绍, 并在最后提出有机超导体可能是实现室温超导的候选材料体系之一。

浙江大学曹光早教授对“高温超导新材料探索的思考—复合结构”作了全面详实的介绍, 报告指出: 铜氧化物和铁基高温超导体均具有准二维层状晶体结构, 其关键结构基元分别为 CuO_2 面和 FeAs/Se 层。因此, 高温超导新材料的探索思路之一就是搜索、设计和合成包含新超导结构基元的新材料。报告从非常规高温超导体的共性出发, 提出寻找新结构基元以及包含该基元的复合结构的可能途径。曹光早教授还对复合结构材料的稳定性以及亚稳相的合成策略进行了讨论, 他认为: (1) 探索高温超导新材料需要摒弃传统的“炒菜式” “游

击式”研究范式，破解“by serendipity”魔咒；（2）通过“萃取”高温超导之共性，并合理利用理论和计算研究成果，可进行目标导向探索；（3）寻找“（复合）结构基元”可能是探索新型非常规高温超导体的有效途径。

中国科学院物理研究所金魁研究员对“利用组合薄膜进行新材料探索”作了全面详实的介绍，报告指出：高温超导研究领域面临诸多挑战，如多元化合物实验数据库缺失、相图的多变量特性、认识停留在定性化描述阶段等，迫切需要发展新的实验技术，和传统研究模式形成有效互补。“材料基因组”的诞生给关键材料探索和机制认识带来契机，其核心的高通量薄膜实验技术有效加速材料合成与物性表征环节，快速形成相图和实验数据库，进而揭示关键物理规律，给重要新材料探索提供思路。新一代高通量薄膜实验技术与超导领域的交叉融合催生了高通量超导研究模式。金魁研究员在报告中举例说明了高通量超导研究的特色和优势，如近期基于新一代高通量实验技术获得高温超导与奇异金属间的量化物理规律，认识到二者的微观联系等，并期待共商如何发展和推广该模式探索重要新材料。

北京大学黄富强教授以“亚稳相过渡金属硫化物的设计合成与超导探索”为题，对他们最近的研究进展进行了详细的介绍，在本报告中，黄富强教授对他们在TMD材料的最新进展进行了系统的介绍。基于固体化学中“结构功能区”的晶体结构设计思路，黄富强教授发现了 $2MWS_2$ 是一种新型拓扑超导体。通过角分辨光电子能谱发现亚稳相 $2MWS_2$ 的拓扑电子能带结构，超导序参量和拓扑表面态使得 $2MWS_2$ 产生各向异性的马约拉纳束缚态；在二维 $2MWS_2$ 上发现自旋-轨道-宇称耦合超导新机制，实现面内方向超高的上临界磁场； $2MWS_2$ 在低温区经历超导-费米液体-奇异金属的转变，并发现费米液体准粒子转变为奇异金属过程中载流子巨大熵变。

东南大学熊仁根教授对“有机光铁电体能否为超导材料带来新可

能？”作了全面详实的介绍，报告指出：铁电材料是一类具有自发极化，且自发极化在外电场作用下可重取向的晶态化合物。铁电材料的极化内建电场可以驱动电荷（离子）分离，从而有望实现超导性的可控调制。熊仁根教授在报告中提出了一种全新的铁电范式，即共价键重组型铁电体。这类材料的铁电性、介电性、压电性等性质能够被光所调控，故光铁电体的开发对拓展铁电材料的功能特性及应用前景有重要意义。因此，熊仁根教授团队期待通过铁电化学理论，开发更多具有优异铁电性能的有机光铁电体，并将该类材料应用于超导效应的研究。尤其值得注意的是，有机光铁电体的极化内建电场可以通过电场或光场进行双通道调制，这有望为超导研究带来新的机会。

四、论坛总结

论坛上，与会专家围绕三个议题 23 场主题报告开展了热烈的讨论和思想碰撞。论坛最后，由向涛院士代表三位论坛召集人进行总结，对相关的关键科学问题、领域的未来发展方向以及相关建议进行了梳理和总结，形成了共识。

1. 领域目前的定位以及探索室温超导的经验规则

超高压下富氢材料中高温超导电性的发现为探索室温超导带来了新的希望，但同时也带来了新的挑战，即如何实现常压下的室温超导。相比之下，铜基和铁基高温超导体虽然超导温度距离室温还有一段距离，但是它们是在常压下实现的超导电性，因此通过高温超导的研究来探索新的高温超导材料依然是探索室温常压超导非常重要的途径之一。向涛院士在总结中对“解决高温超导问题的标准是什么？”这一关键科学问题也进行了回答，提出了三个基本标准：（1）概念标准：问题的解决会带来新的概念和思想的突破；（2）普适性标准：问题的解决会带来新的系统性理论框架和方法的诞生；（3）美学标准：基本物理问题的答案通常很简洁、很美。在上述三个标准下，向涛院士认为，按照概念标准，高温超导提出了大量新概念和新思想，但离突破

还有距离，还不能进入教科书；按照普适性标准，高温超导提出了大量新的实验和理论研究方法，但系统性理论框架还没诞生；按照美学标准，高温超导理论依然不够完美。因此，按照上述三个标准，我们距离解决高温超导问题还有一段不小的距离。虽然高温超导问题依然悬而未决，但是铜基和铁基高温超导体的研究带给人们一个认识多体量子世界的重要窗口，并由此推动了一系列重要实验技术的发展，为物质科学研究提供了重要的基础。室温超导的研究也必然会极大地推动物质科学研究领域的发展，形成新的学科方向和前沿，并催生新的实验技术的发展。结合高温超导研究的经验，在传统超导体原有的探索规律（Bernd Matthias rules）基础上，向涛院士在总结中提出了探索室温超导体新的经验规则（Wish Garden rules）：（1）黑色材料（black is good）；（2）金属化的西格玛键（metalizing sigma-bonding is good）；（3）接近一个临界失稳（proximity to a critical instability is good）；（4）轻的元素和 3d 轨道电子（light element and 3d are good）；（5）高压环境（high pressure is good）；（6）与理论合作（stay harmony with theorists）。上述新的规则为今后探索室温超导提供了方向性的指导。

2. 超高压下富氢高温超导体

关于超高压下富氢材料中的高温超导电性，与会专家进行了充分的讨论和思想碰撞，达成一些重要的共识：（1）氢的 1s 轨道电子在费米面上是富氢材料实现高温超导的必要条件之一；（2）目前的理论计算表明：100 GPa 以上的超高压以及笼状结构是实现高温超导电性的重要因素。同时，与会专家也对该方向的实验提出了挑战，认为更加可靠的零电阻以及 Meissner 效应的实验证据依然是需要实验学家继续努力的方向。另外，富氢高温超导体中是否会出现新的物理也是与会专家非常关心的问题，也需要在后续的研究中继续探索。

3. 铜基和铁基高温超导体

关于铜基和铁基高温超导体的机理研究，虽然距离解决高温超导

问题依然有不小的距离，但是与会专家对领域所面临的问题进行了非常深入的讨论，提出了一些重要的共性问题：（1）揭示高温超导机理的关键证据是什么？要回答上述问题，与会专家认为我们首先要回答另外一个问题：到底什么是高温超导体本征的性质，我们是否已经获得了解决高温超导问题所需的实验技术或者是理论；（2）铜基高温超导体和铁基高温超导体是否具有相同的机理？所有的高温超导体是不是都会统一在一个理论框架下？

最后，向涛院士认为，只要继续坚持，高温超导研究领域在未来的十年一定会取得重大的成就，希望大家能继续努力。

本次论坛充分发挥了中国科学院学部对我国科学技术前沿的引领作用。专家们立足我国高温超导研究的发展现状，进一步明确了未来高温超导领域的发展思路和发展目标，将为解决高温超导问题和探索室温超导体起到积极的作用。

（作者：吴涛，教授，中国科学技术大学；王震宇，特任教授，中国科学技术大学；项子霖，特任教授，中国科学技术大学；应剑俊，特任研究员，中国科学技术大学；蒋坤，特聘研究员，中国科学院物理研究所）

联系方式：中国科学院学部工作局科学普及与学术处，010-59358310