

综合极端条件实验系统

中国科学院物理研究所

“综合极端条件实验系统”是中国科学院在财政部支持下于2007年前后部署的国家重大科研装备研制项目。该实验装置的核心是极低温、强磁场、超高压和超强超快激光等相互交叉的极端实验条件，以及围绕这些极端条件建立起来的一系列实验支撑系统，包括物性表征系统、电学量子调控系统、光学量子调控系统、固体核磁共振量子调控系统、高压和超高压发生系统、超短超强激光场产生系统、极端光场先进操控系统、极端条件下多电磁波段诊断系统、极端条件下高能粒子先进诊断系统等。这一实验装置建成后，被用于开展量子输运、量子自旋电子学、固态量子计算、极端相对论物理、高能量密度物理以及超快物理与化学过程等量子论、相对论方面的前沿研究，为量子反常霍尔效应的发现等重要研究成果的产生作出了贡献。

仪器研发背景

从远古各种简单工具的运用到望远镜、显微镜乃至当代大型对撞机的使用，历史上许多重大的科学发现都得益于实验条件的拓展和技术手段的进步。近年来，人们利用各种极端条件取得了许多具有深远影响的科学突破，其中不少工作获得了诺贝尔奖，也有大量创新性的研究成果得到重要的实际应用。利用1种或者多种综合在一起的极端实验条件取得创新突破，已成为了当今科技发展的一种重要范式。

如果说大型对撞机主要用于研究物质的基本单元及

其构成、研究在宇宙大爆炸之初的能量和时间尺度上物质的状态，那么低温制冷机则主要用于研究物质在极低温条件下呈现出来的宏观量子现象和集体运动行为。大爆炸之后我们的宇宙正在不断地冷却。现在宇宙的背景温度大概冷到了3 K左右。而运用现代制冷技术，人们已经可以在实验室中创造出比宇宙背景温度低得多的极低温条件。在此基础上，科学家们先后发现了整数量子霍尔效应、分数量子霍尔效应、 ^3He 超流等重要的宏观量子现象。这些伟大的发现先后获得了诺贝尔物理学奖。我们完全有理由相信，随着制冷技术的继续进步，必定会有更多重要的量子现象在更低的温度下被发掘出来。

鉴于包括极低温、强磁场、超高压和超强超快激光在内的综合极端实验条件的重要性，世界上许多发达国家或地区，如美国、欧洲、日本都竞相在此领域投入大量的人力和物力，展开激烈的竞争。许多著名的研究机构，如美国佛罗里达强磁场实验室、劳伦斯·利弗莫尔和洛斯·阿拉莫斯国家实验室，法国格勒诺布尔的尼尔研究



电学量子调控系统

执笔人：吕力

所和欧洲强磁场中心，日本东京大学固体所极端条件实验室，德国马普量子光学研究所及核物理研究所等都拥有先进的极端条件实验设施。

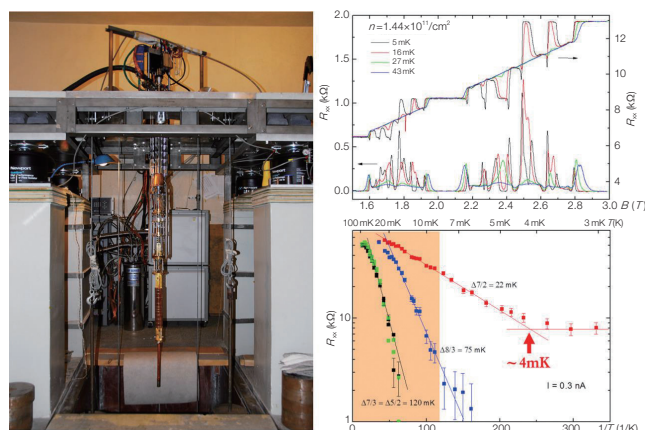
在 2007 年前后，中国科学院物理研究所在主管部门和财政部的大力支持下，开始利用现代科学技术建立研究物质科学的综合极端条件实验装置，希望装置建成后能够从材料合成、结构分析、物性研究和器件制备多个角度，为物理、化学、材料科学、生命科学、地学和环境科学等多个领域的创新研究提供强劲支撑，在更为广阔和深入的层次上为基础、应用和国防等多学科领域的创新探索创造机遇。

取得的进展

综合极端条件实验系统的核心是相互交叉的极低温、强磁场、超高压、超强激光、超快激光等极端实验条件，以及围绕这一核心集成的一系列适合于在极端条件下工作的外围实验支撑和测量系统。

在极低温相关的建设内容方面，该系统基于国内第一台核绝热去磁装置搭建了最低温度小于 1 mK、磁场强度为 9 T 的电学量子调控系统，使得关键技术指标 B/T 成功达到 1×10^4 ，这是我国在相关领域的首个突破。该项目的研究人员利用这套系统将砷化镓二维电子气样品的电子冷却到了 4 mK 的温度，达到国际最好水平。这套系统为后续开展量子调控方面的研究提供了噪声极低的实验研究平台。

此外，该项目还建成了极端条件下的固体核磁共振量子调控系统、极端条件下的物性表征系统、适合极低温、强磁场条件的高压发生装置等。其中，极端条件下的物性表征系统成功将光谱测量与低温、强磁场等极端条件结合起来，有效地拓展了研究手段，对于发现和揭示复杂现象背后的物理机制有着重要意义。该项目的建成使得我们的光谱测量位居世界上为数不多的先进实验室之列，它可广泛用于不同材料的电子性质研究，包括高温超导体和相关强关联电子系统、拓扑绝缘体、半导体等。配



基于核绝热去磁制冷的电学量子调控系统（左）能够成功将砷化镓二维电子气样品中的电子冷却到 4 mK，达到国际最好水平（右）

右下图橙色区间为文献中能够找到的国际最好数据所能达到的范围，可以看出在 $1/T$ 的横坐标上该装置得到的实验数据在 4 mK 温度以下才趋于饱和

合 7 mK 稀释制冷机的 20 T 超导磁体系统已经在砷化镓二维电子气分数量子统计和拓扑绝缘体等前沿科学问题上开展了深入的研究工作，使得该项目的研究人员在国际上第一个成功实现了拓扑绝缘体的门电压调控，并且在量子反常霍尔效应的发现中起到了重要作用。

除了在极低温领域取得研究进展以外，该仪器建设项目在超强、超快激光方面也取得了令人瞩目的研究成果。该项目的研究人员开展了基于 CPA（啁啾脉冲放大）技术的飞秒超强激光研究，从产生高质量种子脉冲的克尔透镜锁模飞秒钛宝石激光做起，通过不断参考国际上的最新进展，比较各种单元技术的特点，依靠自主设计、自行建设，先后研制成功峰值功率为 1.4 TW、20 TW、350 TW 的极光 I、II、III 系列装置。并且从最初的跟踪模仿到后来的跨越创新，利用自主提出的新型高对比度前级放大方案及改进的双啁啾脉冲总体放大系统，得到了平均峰值功率达 1.16 PW、对比度优于 10^9 的超强激光输出。这一峰值功率不仅是当时同类研究的国际最高纪录，也是当时所见 PW 级超强激光装置的最高对比度。该装置已被用于高对比度超快 X 射线的产生和激光质子加速的实验研究，并取得初步结果。另外，研究团队还研制了重复频率为 0.1 Hz，峰值功率达

到 118 TW 的强激光装置，为开展相对论量级高能量密度物理以及快点火物理实验研究提供了坚实的平台。在超快激光方面，研究团队成功研制出了脉冲宽度小于 5 fs，能量大于 0.5 mJ，载波包络相位（CEP）稳定的周期量级激光脉冲装置，该装置达到国际先进水平，为开展阿秒（ 10^{-18} s）脉冲产生及其应用打下了坚实的基础。

独创性

在项目的研制过程中，研究人员发展出了多项独创的方法和技术，使得系统的多项功能和技术指标达到了国际先进水平。

为了研究量子态的演化，需要把各种干扰信号降到量子极限，使得量子态在尽可能长的实验时间内不被退相干。为此，研究人员在基于核绝热去磁装置搭建电输运测量系统的时候，采取了多重屏蔽、滤波、隔离和优化接地等措施，并独创性地发展了电容滤波冷却方案。在这一实验方案中，样品始终处于真空中，而不像国外同行那样需要把样品浸泡在 ^3He 池中才能冷却降温。这种实验方案不仅使得装卸样品更方便，也在降低电子温度方面达到了更好的效果，使得系统在二维电子气样品上实现了国际最低的 4 mK 电子温度。

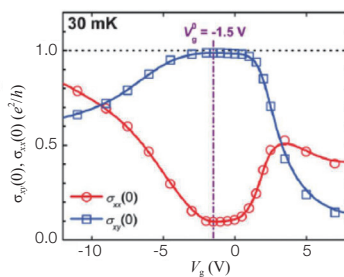
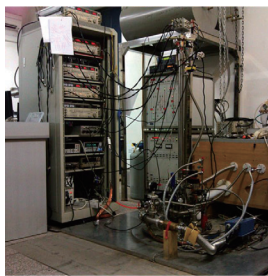
除了在单项极端条件上取得国际瞩目的指标以外，在综合极端条件的结合方面，研究人员也发展了一系列各具特色的实验测量和调控系统。极低温与超快激光的结合就是这一项目的一个亮点。团队成员克服了技术难题，搭建成功了极低温与超快激光结合的超快激光自旋

光栅光学量子调控系统。这样的测量技术之前国内没有，国外也只有 2—3 个小组拥有。这套系统的建成为我国开展自旋动力学方面的研究提供了技术保障。

应用案例及代表性科研成果

综合极端条件实验系统建成后，在基础科学方面取得了一些重要的科学发现，提升了我国在相关基础研究领域的学术水平和国际地位。

该实验装置的一部分是一台经过改装、采用了有特色滤波接地方案的稀释制冷机，为电学量子调控提供了纯净的极低温环境。这一实验装置被用于拓扑绝缘体相关的工作中。研究人员通过与清华大学薛其坤院士团队合作，首次在 Cr 掺杂的 $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ 样品中观察到了不需要外加磁场的量子反常霍尔效应。该实验结果被霍尔丹（F. D. M. Haldane）教授在其 2016 年诺贝尔奖获奖演说中作为拓扑量子物质领域最重要的实验结果之一加以介绍，并被诺贝尔奖官网在介绍 2016 年度物理学奖时引用。



经过改装后的极低温强磁场综合条件测量系统（左）以及磁性拓扑绝缘体中的量子反常霍尔效应（右）

该结果被诺贝尔奖官网在介绍 2016 年度诺贝尔物理学奖时引用

专家点评

“综合极端条件实验系统”包含了极低温、强磁场、超高压、超快超强激光等极端实验条件，以及围绕这些条件的一系列实验研究系统，总体设计理念先进，实现了部分极端条件的综合与交叉。该系统的各项技术指标达到了或优于实施方案规定的要求。项目组已经利用建成的综合极端条件取得一批高水平的研究成果。通过该项目的建设还培养了一支经验丰富的技术队伍，为我国进一步发展综合极端条件下的科学研究积累了宝贵的经验。

——丁洪，中国科学院物理研究所研究员，北京凝聚态物理国家研究中心常务副主任和首席科学家