

清华大学物理系复系40年以来粒子、核与天体物理方向的发展

肖志刚[†] 陈新^{††}

(清华大学物理系 粒子物理核物理天体物理研究所 北京 100084)

2022-08-01收到

[†] email: xiaozg@mail.tsinghua.edu.cn

^{††} email: xchen22@mail.tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20220806

清华大学物理系于1982年复系，至今已有40年。物理系复系时，从工程物理系转过来一批教师，组成物理系二部的几个教研组，包括理论物理、固体物理(后改为凝聚态物理)、核物理、原子分子物理教研组等。1999年，教研组改成研究所。复系之后的核物理教研组继承和发展了若干相关研究方向，包括石油测井、激光同位素分离、单原子探测、原子核高自旋态、电子动量谱学以及量子信息等。其中单原子探测、电子动量谱学和量子信息等研究方向先后转入原子分子物理研究所。粒子物理研究方面，复系之前，徐璋本先生早年曾撰写过粒子物理及统一的论文，张礼先生很多年前在很困难的条件下坚持以因材施教的方法培养学生开展一些粒子物理方面的学习和研究。1982年复系之后，张礼、邝宇平以及孙洪洲分别对粒子物理和核物理理论研究的建立与发展起到了重要作用。1997年，庄鹏飞回国后在物理系建立了高能核物理研究组。1999年，理论物理教研组与核物理教研组合并成立了高能物理与核物理研究所，王青和龙桂鲁先后担任所长。粒子物理与核物理学科于2001年被批准为国家重点学科。2004年清华成立了跨院系的粒子物理研究机构——清华大学高能物理研究中心。2005年，邝宇平院士作为召集人在国内发起成立了TeV物理中国工作组，聚集了国内在超出标准模型的新物理方向工作的几乎所有研究人员，定期开展交流和合作。物理系先后加入S π RIT、ATLAS、CMS、FASER、XENON等大型国际实验合作组，粒子与核物理的实验研究队伍不断成长，国际知名度不断扩大。清华大学于2001年成立了清华大学天体物理中心，成员来自物理系，李惕碛院士任中心主任。经过20年的发展，天体物理学科逐渐扩大，研究领域涉及理论、数据分析、数值模

拟、实测天文以及合作型的仪器研发等。清华大学于2019年成立天文系，而物理系保留和招聘了精干的研究人员，主要开展天体理论与与粒子核物理交融的天体和宇宙学领域，以及时域天文学和观测宇宙学等研究。粒子、核与天体物理研究紧密关联，基于此正在逐步形成一个老中青三代科研和教学骨干传承和创新的格局。复系40年以来，物理系在粒子、核与天体物理方面取得了一系列研究成果。

1982年复系时从工程物理系划到物理系核物理教研组的人员有：陈颀延、陈学俊、陈迎棠、陈振鹏、林琴茹、马文超、齐卉荃、尚仁成、吴学超、徐四大、许祥源、张玫、朱胜江等。其后陆续又引进或聘用不少教学与科研人员，他们是：孙洪洲、文克玲、邓景康、马万云、龙桂鲁、宁传刚、庄鹏飞、庞文宁、阮东、李岩松、肖志刚、徐喆、何联毅、叶志鸿等。粒子与天体物理方面，在早先的张礼、徐湛、邝宇平等之后，还陆续引进或聘用王青、李惕碛、楼宇庆、陶嘉琳、王晓锋、张斌、毕楷杰、张有宏、陈新、安海鹏、胡震、高飞、鲜于中之等。

20世纪80年代，由物理系博士生张达华与指导教师张礼和徐湛合作提出了一套利用旋量内积来表达无质量规范场的极化矢量的方法，被国外同行称为“Chinese magic”，以此为基础涉及规范场的散射过程的截面可以在振幅层次进行计算和化简，为在对撞机上计算强作用背景提供了十分有效的方法。这个方法后来得到业界持续关注和发展，发现了很多多点规范场螺旋度振幅的不同性质、递推关系和严格表达式，逐渐演变为当今量子场论最为活跃的研究方向。

孙洪洲等人在20世纪80年代扩展了原子核的相互作用玻色子模型(IBM)，首先给出质子—中

玻色子模型(IBM2)的动力学对称性,原创性地提出包含同位旋和自旋自由度的相互作用玻色子模型(IBM4),并将其成功应用于轻核的结构研究,在国际上产生了重要影响。针对Iachello等人建立原子核的相互作用玻色子-费米子模型(IBFM)所遇到的巨大困难,孙洪洲等人提出在动力学对称群链的更大群上分解,预言的能谱结构与实验完全符合,成为原子核动力学超对称性的最好证明。这些工作以及群表示论方面的重要成果,获1986年国家教委科技进步一等奖、1997年国家自然科学奖三等奖(孙洪洲、韩其智、刘玉鑫、王家军、龙桂鲁)。

邝宇平等人在20世纪80年代首次建立和发展了重夸克偶素强子跃迁的系统理论方法,后指导学生首次给出有耦合道效应的强子跃迁理论,提出有量子色动力学(QCD)意义的重夸克势模型。2002年邝宇平计算了在BES和CLEO-c上寻找 h_c 粒子和 $\psi(3770)$ 的 $\pi\pi$ 跃迁过程,2005年被BES和CLEO-c的实验结果及2009年BESIII更精确的 h_c 粒子产生的结果所证实,否定了Voloshin、Shifman等人的理论及其对邝宇平-颜东茂理论预言的长达19年的异议和争论。这些工作前期获得中国物理学会1989年首届吴有训物理奖及国家教委科技进步奖(1987年二等奖和1994年一等奖)。邝宇平等的理论所作的20多个预言已有16个被后来国际大实验室陆续做出的实验证实,此理论已成为当前处理重夸克偶素强子跃迁问题最成功的理论。

朱胜江等人从1987年起一直从事原子核高自旋态的实验研究。国内在中国原子能科学研究院与中国科学院近代物理研究所(兰州)加速器上对质量数 $A\approx 100$ 与140区缺中子核进行高自旋态研究。国际上在美国橡树岭实验室、劳伦斯伯克利实验室、Argonne实验室等对 $A\approx 70$ 、150、190区的一些缺中子核进行实验研究,以及研究 $A\approx 110$ 与 $A\approx 150$ 区丰中子核的高自旋态结构。研究组迄今为止共完成183个核的高自旋态结构研究,其中以物理系为第一完成单位的有87个核。研究成果发现一系列原子核高自旋态重要特性,如 $A\approx 100$ 缺中子核区的手征二重带结构、 $A\approx 140$ 缺中子

核区的形状驱动效应、 $A\approx 110$ 丰中子核区的多声子 γ 振动带、赝自旋伙伴带、软手征带、 $A\approx 150$ 区丰中子核区的八极形变带、首次发现反射不对称性八极形变与反射对称性的四极形变形状共存特性以及一系列新的原子核结构特性。研究工作曾获教育部科技进步奖二等奖、清华大学基础性研究成果奖以及国家自然科学基金优秀论文鼓励基金等。

在20世纪90年代,物理系博士生何红建与指导教师邝宇平和中国科学院理论物理研究所的李小源纠正前人错误,首次严格证明了电弱对称性破缺的规范粒子纵向极化与它所对应的Goldstone粒子相互等价的定理,并推广到更广泛的有效拉氏量的等价定理,使等价定理可以真正应用于探索超出标准模型的新物理。这些工作获1999年教育部科技进步奖二等奖。

研究量子系统的各种对称性一直是物理理论的重要问题,描述对称性的数学工具是群、李代数及其扩展和变形。1998年,阮东等人首次给出了李代数 $O(N)$ 的生成元的约化矩阵元, $O(N)\supset O(N-1)$ 张量型约化因子、对称表示的旋量型约化因子,以及 $O(N)$ 的三参数Racah系数的解析表达式。利用Clifford代数与李超代数的关系,得到了 $N=4$ 超对称量子力学的一般结构,以及两个超共形代数。2000年,阮东等人利用所提出的不可约张量分解法给出了一类新的非线性代数即平方根型李代数的一般结构,以及它的各种表示,为一类量子系统的精确可解问题提供了又一研究手段。系统地研究了例外李代数 G_2 、任意幂次多项式角动量代数和更一般变形代数的不可分表示、诱导表示和各类玻色子实现等。研究了非线性李代数在量子系统中的应用。

自2000至2015年,物理系王青和其学生一起建立了从量子色动力学出发系统地推导和计算赝标介子低能有效拉氏量的理论体系,发展了相应的计算方法和计算机上进行解析推导演绎的程序。通过十多年的努力,已经能够给出赝标介子有效拉氏量的 p_2 、 p_4 和 p_6 阶的所有正常项和反常项上百个系数的数值,将它们与已知的实验结果相比较基本一致。这些在标准模型中的强作用低能赝

标介子系统中建立的理论体系被分别推广到包含 η' 介子和矢量介子的情形。另外在强作用中发展出的从基本理论研究低能有效理论的方法也被王青等做了更一般性的推广,并应用去研究一类新物理模型——顶夸克辅助的人工色理论的低能有效理论。

2006年,物理系张斌与清华长江讲座教授——美国威斯康星大学的韩涛合作,提出在对撞机上探测破坏轻子数守恒的过程,来研究马约拉纳中微子,相关论文提出了新的观测道,把传统观测道对小混合参数的4次依赖关系降为2次,大大增加了探测精度。论文被汤森路透基本科学指标数据库评为在“Neutrino Mass Constraints”领域引用最多的文章。在此基础上,张斌研究组全面分析了在各种实验中重马约拉纳中微子的探测方法及其灵敏度,引领了在原子核内、天文观测、对撞机上和宇宙射线等领域探测马约拉纳中微子的一系列研究工作。

2005年,庄鹏飞等在有限温度密度时将QCD有效模型从平均场近似推广到包含量子涨落,在夸克模型中研究了量子涨落对强相互作用相变的影响。他们的计算结果正确反映了夸克控制高温高密相,强子控制低温低密相的真实物理。2018年,庄鹏飞研究组发展了等时量子输运理论,使得研究量子离壳效应对高能输运的影响成为可能。他们发展的等时量子输运理论是研究高能输运过程中离壳效应的基础,对于澄清协变理论与等时理论之间的联系,建立可以作为初始问题求解的输运过程迈出了第一步。在重夸克偶素长期被认为是探测夸克物质的探针。2020年,庄鹏飞提出用重夸克偶素的横动量分布探测夸克物质。他们在相空间建立了重夸克偶素的输运方程,将重夸克偶素探针与被探测物质的时空演化关联起来。这个描述重夸克偶素在夸克物质中产生和消灭的模型被国际同行称为“细致输运模型”或“清华模型”。

在天体物理方面,自2002年楼宇庆等结合数据和理论建立了太阳光球层及其内层的Rossby型惯性波与准周期性的太阳磁活动和地球磁活动的联系,指导郑琛研究木星两极区准周期活动(近年

来包括土星),持续发表漩涡星系磁流体密度波理论系列文章;同时指导沈悦开拓了一系列自相似流体和磁流体力学问题的研究;分别指导胡剑和伍岳研究磁化星系团中的Sunyaev—Zel'dovich(SZ)效应;于2005年底带领边福彦用TNT 80厘米光学望远镜在国际上率先发现两颗新的超新星2005mc和2005mf,此为大陆高校首次。作为西藏羊八井AS γ 国际合作实验团队成员,楼宇庆积极参与合作和数据结果科学分析,包括发表于*Science*杂志的银河宇宙线的各向异性和共转的观测结果,首次探测到来自蟹状星云的能量超过100 TeV的 γ 光子(PRL,业界和媒体广泛关注),以及通过对一个超新星遗迹和其中的脉冲星的观测发现非常高能 γ 射线与分子云(而不是脉冲星)相关联(*Nature Astronomy*)。楼宇庆积极参与中国的深空探测计划。另外,楼宇庆等在磁化漩涡星系磁流体密度波与宇宙射线气体耦合,用新疆射电望远镜监测木星内辐射带准周期活动,解释星系核球中超大质量黑洞的若干幂律关系,预言磁星(magnetar)的前身星为磁化大质量恒星,以行星状星云动力演化模型解释其弥漫X射线辐射,分子云核中形成原恒星的动力演化模型,预言球状星团中心动力塌缩形成中等质量黑洞的若干幂律关系,宇宙包括早期宇宙中巨大物质库的广义多方相对论动力塌缩快速形成超大质量和绝超质量黑洞,稳态非线性磁流体解的不唯一性,自引力气体球中的自相似汇聚激波,流体和磁流体束条在自引力作用下的自相似动力演化,磁化超大质量恒星模型中广义相对论磁流体性质和在所谓的“黑洞质量禁区”形成黑洞的机制,小质量恒星形成过程中物质吸积率随时间降低的“光度问题”等方面取得了一系列有趣的、重要的研究成果。

在观测天体物理方面,王晓锋等自2004年以来依托清华大学80公分望远镜开展超新星研究;自2010年以来,王晓锋利用中科院多台望远镜在国内率先开展大视场时域天文学方向研究,带领团队累积发现400多颗新爆发的超新星,发现邻近超新星的数目位居国际前列;自2019年带领课题组建成独特的清华大学多镜筒巡天观测设备(TMTS),运行两年来累积发现>1万颗短周期变星

及掩食双星，其中发现的周期短于1小时的高价值样本数量>200颗，占国际总数的70%以上。基于上述一手观测数据，王晓锋在包括超新星在内的各种宇宙瞬变天体的探测、后续光谱和测光观测、爆发物理以及宇宙学应用等方面开展了系统的研究并取得了一系列国际领先的重要成果。2008年，王晓锋首次证认出一类爆发时外包层物质扩展速度快50%的高速Ia型超新星子类，区分该子类后可将Ia超新星的测距精度由9%提升到6%，该结果对Ia超新星宇宙学应用研究产生了重要影响。所提出的光谱特征鉴定方法被称为“王分类”方法，是国际Ia超新星分类的三大方法之一，并被广泛使用。2013年，王晓锋发现Ia超新星的观测差异由主要受爆发前星体的金属丰度影响，否定了国际上长期流行的几何效应观点(发表在2013年*Science*上)。2019年，王晓锋带领国际团队首次捕捉到Ia超新星爆发的第一缕光，为揭示其爆发物理起源提供了关键线索。2022年，王晓锋团队通过对TMTS巡天发现的一颗大幅度快速脉动变星的细致观测研究首次确认其源于壳层氦燃烧的热亚矮星模型，为该领域突破性进展(2022年*Nat. Astron.*)。王晓锋的一些成果获评2014年“中国天文十大科技进展”以及2018年“中国天文十大科技进展”。

2015年，徐喆等将玻色统计引入到描述相对论重离子碰撞中胶子时空演化的玻尔兹曼方程，对静止非膨胀、非平衡态胶子系统的胶子凝聚进行了研究。他们首次在输运计算中实现了过剩胶子系统的玻色—爱因斯坦凝聚，观察到凝聚从出现，逐渐增长到停止增长的全过程，并发现胶子凝聚对胶子热平衡过程的重要作用。2022年，在研究重离子碰撞中电磁场的演化时他们发现，QCD物质产生时，尽管其置身于电磁场中，但是由衰减的电磁场诱导出QCD物质的法拉第电流是一个从无到有的过程，在这个过程中法拉第电流的大小低于欧姆定律所给出的值，使得QCD物质的感生磁场大小比目前认可的值小了两个数量级。该工作在美国物理学会的*Physics Magazine*以“*Ohm's law violated in heavy-ion collisions*”为题作了专题报道。

肖志刚建立了实验核物理研究组(ENPG)，主要从事重离子核反应与非对称核物质状态方程实验和唯象研究以及部分核谱学工作。ENPG自主研制了一套紧凑型的重离子核反应谱仪(CSHINE)，基于国内的重离子加速器大科学装置HIRFL完成多轮束流实验，得到对称能在饱和点处随密度的斜率参数；采用同位旋计时方法，得到了费米能区核反应中氘、氚和氦的出射时标次序。在高密区，肖志刚与理论同行合作，发现软的对称能可以解释实验中 π^-/π^+ 的增强，触发了国际上对 π 介子产生与运输的深入研究。与国内同行一道，推动基金委重大仪器项目“兰州低温高密核物质测量谱仪(CEE)”的最终立项建造，并承担其中部分研制任务。ENPG积极参与国际合作，加入了位于美国布鲁克海文国家实验室的STAR合作组，参与中国科学家在南非iThemba实验室和美国Gammasphere终端上的实验研究，与波兰玛丽·居里大学合作开展裂变的理论方面的研究等。2013年，肖志刚研究组加入RIKEN的 \sqrt{s} RIT合作组，在高密区核对称能研究中做出贡献。

物理系2014年正式加入欧洲大型强子对撞机LHC上的ATLAS实验合作组，陈新等参与了上帝粒子——希格斯粒子与 τ 轻子耦合的发现之旅。2016年，综合ATLAS和CMS Run-1数据的结果，希格斯粒子和费米子的耦合方式被首次直接观测到。2018年，ATLAS实现了对 $H\rightarrow\tau\tau$ 衰变的发现。陈新等致力于在LHC上寻找希格斯粒子超出标准模型预言的性质，如首次利用 $H\rightarrow\tau\tau$ 衰变寻找 $t\rightarrow Hq$ 这种包含味改变中性流的过程，寻找具有轻子数破坏的希格斯衰变过程，希格斯粒子CP性质的测量，寻找具有6维反常耦合算符的重希格斯粒子等。同时理论方面开展了与 τ 轻子和暗物质有关的唯象研究。2022年研究组在全粲四夸克态研究中取得了突破性的成果，发现了四夸克态新衰变模式的迹象。在硬件方面，研究组与中科院高能所联合进行硅微条探测器的生产与调试，用于ATLAS探测器升级改造。

物理系2019年正式加入LHC上的CMS实验合作组，胡震等和南京师范大学展开合作，提出了在双 J/ψ 质量谱上寻找四夸克粒子的原创课题，

并于2022年发现全粲四夸克粒子家族,这是中国首次在CMS实验上主导新粒子的发现。此外,研究组在四轻子末态对希格斯粒子性质进行了测量,研究组中多人在CMS合作组中担任管理职务,曾获CMS合作组2021年年度奖。硬件方面,与北京大学联合进行GEM探测器和MTD探测器的研发与生产,与中科院高能所联合进行HGCal探测器的研发与生产,用于CMS探测器升级改造。

物理系2019年正式加入欧洲大型强子对撞机FASER实验,是FASER国际合作组成立的16个创始单位之一。胡震和陈新研究团队独立承担了径迹探测器前端电子学监控系统的研发和生产。FASERv是FASER合作组测量TeV能级中微子项目,2021年首次探测到来自对撞机的中微子候选事例。

物理系2020年加入XENON国际合作组。高飞等在XENONnT暗物质探测实验的探测器调试、升级、物理数据采集与分析中发挥了关键的作用。研究团队负责氙气制冷、纯化系统的维护工作,负责暗物质、中微子探测等物理目标中的偶然符合本底分析。2021年,合作组利用XENON1T实验实现了太阳中微子的探测。高飞等与哥伦比亚大学合作,首次利用液氙暗物质探测器寻找反应堆中微子相干性弹性散射信号,将暗物质探测灵敏度压低至中微子本底“地板”附近,为未来利用暗物质探测器探测天体物理中微子奠定了实验基础。

2010年,肖志刚参加美国杰弗逊国家实验室(JLab)的高能电子核子碰撞实验,参与了JLab的全新大科学装置SoLID的前期研发。叶志鸿深入参与JLab的电子碰撞实验,作为实验发言人之一完成了氙靶实验的第一个物理分析并发表于*Nature*,同时设计提出第二代氙靶实验。叶志鸿参与中国首个电子核子碰撞实验装置——电子离子对撞机(EiCC)的设计和研发,同时在美国已批准的电子离子对撞机(eRHIC)项目上参与和负责多个探测器的研发。

2018年,安海鹏等提出了利用太阳加速暗物质的方法。小质量的暗物质如果可以电子发生碰撞,会被太阳中的电子加速,从而获得一个100 eV到1 keV的动能,这样它的动能就超出了

传统的暗物质实验的阈值,从而可以被探测到。此方法大大提高了现有的直接探测实验对暗物质的探测范围。2020年,安海鹏等利用有自相互作用的暗物质的模型研究了NGC1052-DF2和NGC1052-DF4这种特殊星系的演化,发现在引进自相互作用之后,产生这类暗物质稀缺的星系的可能性大幅增加。该工作说明对缺少暗物质的星系的研究可能成为探索暗物质粒子物理性质的重要途径,获得了*PRL*杂志的编辑推荐。2021年,研究利用太阳日冕层中的等离子体把超轻暗光子暗物质转化为单频射电信号,然后利用低频阵列射电望远镜(LOFAR)和正在建设的平方千米射电望远镜(SKA)来进行探测,发现其灵敏度超越了宇宙微波背景辐射对暗光子暗物质模型的限制。

2021年,鲜于中之等提出,一类超轻玻色子在高速旋转黑洞周围形成具有类氢原子能级的BEC态(称为“引力原子”),通常携带巨大的质量四极矩,在致密双星系统中可引起椭圆轨道近心点的显著进动,通过引力波频谱和脉冲双星时延信号进行观测是寻找此类暗物质候选者的有效手段。鲜于中之与哈佛大学Lisa Randall合作研究发现,通过孤立演化合成的双黑洞与通过各类*N*体动力学机制形成的双黑洞,在亚赫兹频段的引力波信号分布具有显著差异,对于探明双黑洞的起源具有重要价值。暴涨时空中的量子场论关联函数是探测高能标新物理的窗口。鲜于中之等首次计算得到了一圈图三点关联函数的完整数值结果,证实了圈图水平上“宇宙学对撞机信号”的存在,为今后宇宙学观测寻找相应的新物理过程提供了理论支持。

自1982年清华大学物理系复系以来,粒子、核与天体方向由弱到强不断发展,已拥有一批知名的学术带头人,培养了一支高水平的人才队伍,理论和实验齐头并进,国际影响力不断提高,为清华大学物理系建设世界一流的科学研究和人才培养中心提供重要支持。

致谢 朱胜江、王青、阮东、庄鹏飞、楼宇庆、王晓锋、徐喆、安海鹏、胡震、高飞、鲜于中之、叶志鸿等老师对本文亦有贡献,在此一并感谢。

1 干式液氮恒温器

应用场景

震动敏感型试验及高真空超低温洁净环境。

特点

干式液氮循环制冷，通过氮气传导冷量隔绝震动，控温范围（5K-300K）。

制冷系统

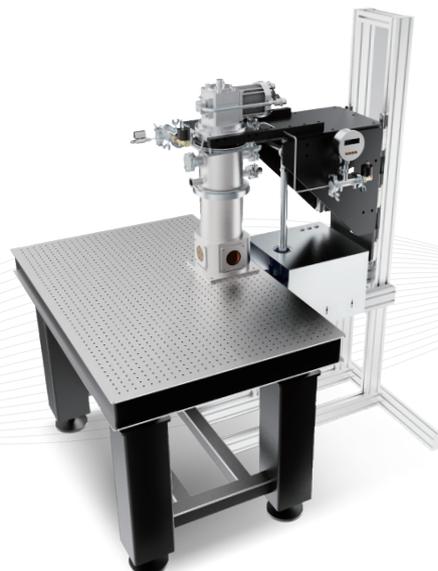
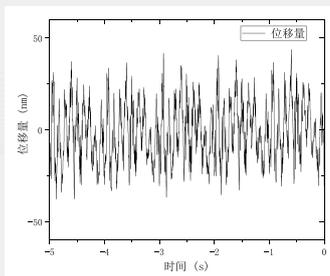
带自动隔离的干式GM液氮制冷系统。

应用实例

显微光致发光、显微拉曼、显微光谱、显微-FTIR、量子点、低振动光学测试、磁光克尔效应(MOKE)。

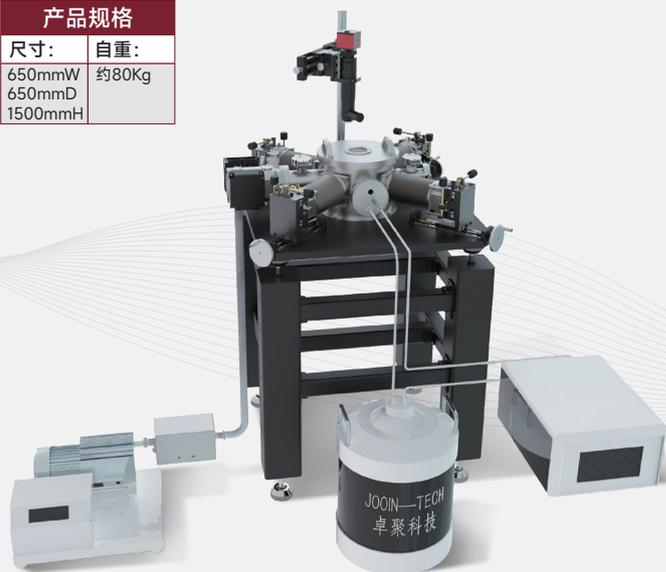
超低震动

样品震动峰峰值小于±50nm。



产品规格

尺寸:	自重:
650mmW 650mmD 1500mmH	约80Kg



2 低温液氮探针台

结构与特点

- 真空腔体:** 真空度优于 8×10^{-4} Pa。降温后优于 8×10^{-5} Pa。留有2个用户法兰接口（可接入气体或者额外的电缆）。
- 探针控制:** 标配4个探针臂（选配6个探针臂）。调节范围 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 30\text{mm}$ ，调节精度优于 $10\mu\text{m}$ 。每个探针臂配备一根Triax三同轴低漏电缆及探针。样品台底座配备额外一根Triax三同轴低漏电缆。
- 显微镜模块:** 连续变倍单筒显微镜，光学放大倍率：0.56X-3.75X（7倍变倍），视频放大倍率约400倍，分辨率 $4\mu\text{m}$ 。全高清数字摄像头，带同轴照明和环形照明，带机械调焦和光学调焦。
- 变温样品台:** 50mm直径；变温范围：80K-400K。控温稳定性优于 $\pm 0.01\text{K}$ 。
- 可选接入光纤，**可将一根或几根电学探针替换为光纤。
- 系统直流漏电低于 1pA 。**
- 含进口分子泵机组、全量程真空规。**

3 干式液氮探针台

应用场景

样品的非破坏检测和高真空超低温洁净环境。

制冷系统

带自动隔离的干式GM液氮制冷系统。

特点

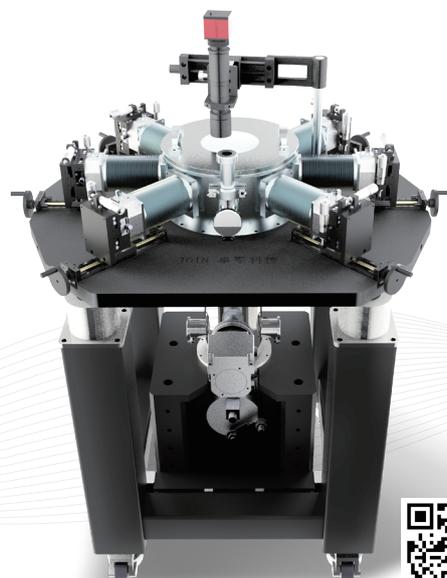
干式可循环制冷，灵活的可拓展接口适用多类型原表，控温范围（6K-400K）。

自研温控仪

配备自动温度控制器（稳定度为0.05K），带有触控界面和LabView驱动。

应用实例

用于直流（DC）、射频（RF）、MEMS、纳米电子、超导性、纳米电路的光电特性、量子点和量子线、非破坏性测试等。



扫描二维码了解更多详情

STM

扫描隧道显微镜

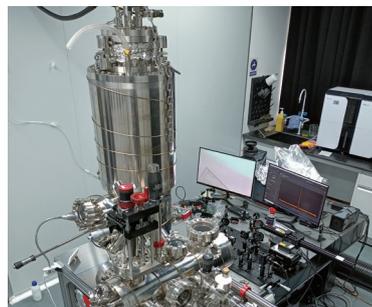
Scanning Tunneling Microscope

主要技术与性能指标

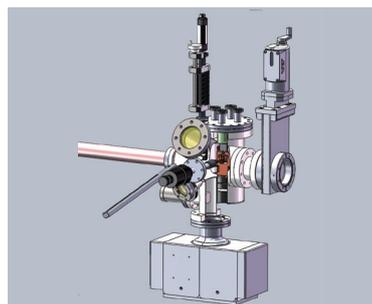
- 系统的真空度 $< 3 \times 10^{-10}$ mbar
- 噪音标准: 电子学噪声 < 100 fA, 机械噪声 < 2 pm
- STM分辨率: X、Y < 0.05 nm, Z < 0.005 nm, 实现高清原子分辨
- 常规版LT-STM可在室温、液氮温度 (77K)、液氦温度 (4K) 下工作
- TERS版为LT-STM与拉曼光谱联用, 可实现针尖增强拉曼光谱测量, 光谱空间分辨率 ~ 1 nm, 增强因子可高达 1×10^9
- Mini-STM 体积小巧, 腔体按需设计定制, 可独立放置于桌面在室温大气环境下工作; 也可连接安装到其他真空腔体上, 在室温真空环境工作。主要用于获取材料表面形貌结构信息

主要应用

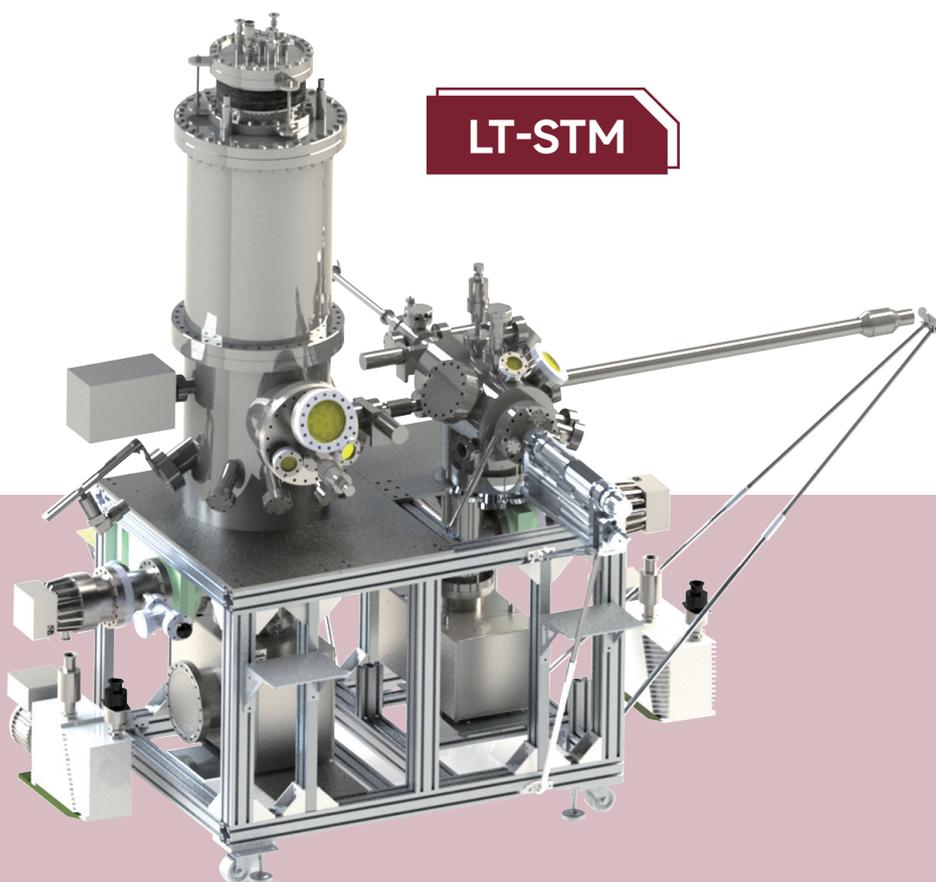
用于表面物理研究, 可获取清洁表面、低维材料、单分子及薄膜的原子结构、局域电子态和激发态信息。



TERS



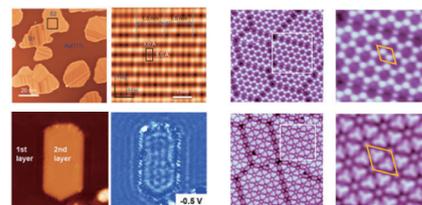
Mini-STM



LT-STM

代表性应用成果

- 硼稀、硅稀的发现
- 二维分子晶体相变研究



- 低维材料表面的高空间分辨TERS光谱

