重点实验室，进入建设期，2013年9月顺利通过科技部验收，2015年6月参加科技部评估并被评为“优秀类实验室”。物理系凝聚态物理学科还是“量子物质科学协同创新中心”和教育部“量子信息前沿科学中心”的重要组成部分。

自1982年清华大学物理系复系以来，凝聚态物理学科由小到大，伴随着国家教育和科技事业的前进步伐，取得了较快、较好的发展。现在，本学科已拥有一批在国内外享有知名度的学术带头人和骨干教师，做出了多项具有国际影响的研究成果，培养了一批优秀的高层次人才。展望未来，凝聚态物理学科将在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的进程中持续贡献力量。

致 谢 本文部分内容改编自主要由熊家炯老师撰写的《清华物理八十年》第六章中凝聚态物理研究所的部分。感谢王亚愚、段文晖、魏斌、姜开利等老师对本文的贡献！

清华大学物理系复系40年以来原子分子光物理学科的发展

尤 力† 李师群 薛 平

（清华大学物理系 原子分子物理与光物理研究所 北京 100084）

2022－08－01收到

† email：lyou@mail.tsinghua.edu.cn

DOI：10.7693/wl20220805

原子分子光物理(atomic, molecular, and optical physics)，简称AMO物理，是清华大学物理系物理学一级学科的重要支撑方向。经过40年的发展，目前已覆盖现代原子分子光物理的关键方向，在精密测量物理和量子信息科学方面拥有国际知名的科研队伍，是国家在AMO方面的重要人才培养和科学研究基地。为庆祝清华大学物理系复系40周年，本文简单回顾物理系AMO学科发展过程中的关键时间点、人和事。

国际AMO学科在过去几十年的快速发展主要受益于原子分子物理学科和光物理学科的交汇融合。清华物理系AMO学科的发展历程类似。1982年复系时，AMO方向的研究主要集中在由原物理教研组(当时简称为一部)形成的两个教研组：原子分子物理教研组和近代光学教研组，主要研究方向包括激光器物理、激光分离同位素、激光光谱、光信息处理及光学薄膜。由原工程物理系合并到物理系(当时简称二部)的部分老师，又新发展了如激光单原子探测和电子动量谱学等研究方向；1997年李家明院士从中国科学院物理研究所调入清华物理系，使得物理系在原子分子物理理论方向上了一个新台阶。之后，AMO学科又相继拓展了量子光学与原子光学、近场光学和微区光谱、生物医学光学、生物信息学、精密测量物理、量子信息、量子模拟、冷原子物理等研究方向。1999年10月，由物理系“原子分子和纳米科学教育部重点实验室”和“近代光学教研组”组成“原子分子物理与光物理研究所”，简称AMO所，李师群任第一任所长(1999—2011)。下面简要回顾原子分子物理学科、光学物理学科，以及合并为系属AMO所这段难忘的发展史。

1 原子分子物理学科

复系初期，原子分子物理教研组的主任是徐亦庄，基本力量是复系前徐亦庄教授领导的红外激光科研组，研究方向是用连续调谐红外激光进

行分子多光子吸收与离解以及激光分离同位素铀。在研制高气压连续调频CO_2和调频CO激光器及其应用方面教研组都取得了很好的进展。1986年，原子分子物理教研组和近代光学教研组合并成近代光学教研组，之后的发展详见“光学学科”部分。

1980年代，由原工程物理系合并到物理系的部分老师，又发展了如激光单原子探测的新研究方向，物理系时任领导高瞻远瞩地顺应了历史发展机遇，面向国家经济建设目标，寻找突破口和发展的支撑力量，将原子分子学科的发展指向有重大应用背景的基础性研究。陈飚延等人提出“激光单原子探测”作为未来发展的“生长点”之一。陈飚延和马万云两位老师在学校拨给的2万元经费和教育部的3万元的专题项目支持下筹备了一个中级物理实验。在国家科委的帮助下，了解到当时“七五”规划中国家在资源与环境领域存在着一项迫切的新技术需求，急需发展能有效

2004年10月8日，在清华大学欢迎Vladimir B. Sovkov夫妇的宴会上(左起：陈飚延、李丽、吴国桢夫妇、Vladimir B. Sovkov夫妇)

2006年6月6日，美国斯坦福大学Zare教授来访(左1：杨杰，左2：莫宇翔，左3：李娟，左5：李丽，左6：李丹，右1：郝玉松，右2：谢锋，右4：张存浩，和Zare教授师生等)

勘察地下深部稀缺贵金属资源的新技术方法。他们决心将微观化的激光单原子探测(LSAD)与宏观化的资源与环境可持续性发展科学相结合，直接探测地下深处金矿床的地质踪迹，即探测深层金原子分子热运动产生并游离运移到地表土壤中形成壤隙气中的气态金。在国家科委和地矿部的组织下，经过各级的可行性论证后，正式列入国家“七五”科技攻关计划重点项目《国家“三零五”工程项目》和《黄金专项》，国家投入250万元以上的启动经费支持。国家科委建议以国家科技攻关计划项目的方式来支持这一基础性研究项目的启步。为推动建立此基础性研究新学科的发展，80年代中期，清华大学决定建立我国第一个“激光单原子探测实验室”。孟昭英院士在创建初期做了大量积极工作。1985年，他邀请国际上“单原子探测”的创始人——美国橡树岭国家实验室的G. S. Hurst教授来清华讲学，并建立了紧密合作关系。到90年代初期，这支队伍已由2个人发展到有17位教师、10位博士后和约20位研究生的规模，成长为一支以青年人为主的专业学术队伍。不少骨干后来还相继承担了行政管理工作：许祥源先后担任过物理系副书记、副主任，清华大学研究生院副院长，海南大学校长，首都师范大学校长、书记；吴国桢曾任全国人大代表、全国政协常委、全国政协港澳台侨委员会副主任、台湾同学会会长、全国台联副会长、台盟中央副主席等；高虹担任过物理系副主任，清华大学研究生院培养办主任、副院长、清华大学深圳研究生院执行院长等；马辉担任过清华大学国际处副处长、物理系副主任、清华大学深圳研究生院副院长等；董国轩先后担任国家自然科学基金委数学物理科学部处长、主任、科学部常务副主任等。这支精干、富有朝气的科研团队，自主研制成功多类型超灵敏高分辨谱仪，装备起一个先进的专业研究和人才培养的基地，承担了多项国家科技攻关、“863”、“攀登计划”和国家自然科学基金委主任基金等项目任务，并成功地将我国当时已有的复杂基体干扰效应条件下ppm (10^{-6})和ppb (10^{-9})的微量分析技术水平进一步向ppt (10^{-12})和亚ppt ($\leqslant 10^{-13}$)迈进。

1994年调入激光单原子探测实验室的李丽教授，利用与合作者麻省理工学院Robert W. Field教授共同建立的微扰增强双共振激光光谱技术，成功地实验研究了Na_2，Li_2，K_2和Cs_2等分子的40多个三重态，包括在理论和实验上都具有重要意义的$a^3\Sigma_u^+$态。她还和同事首次利用高分辨光谱探测Na_2，Li_2和K_2分子的双电子激发态，这些双激发态和同样能区里德堡态的物理行为明显不同，由于电子结构和离子基态有很大差异，不发生自电离。在分子激发态动力学方面研究上，李丽首次在态—态水平实验研究了单重到三重微扰能级在碰撞传能过程中的“通道”效应，首次测量并分析了$Na_2(3^3\Pi_g)$态由势能曲线避免交叉产生的强烈预解离，能级寿命小到250 fs(通常为几十纳秒)。国际著名量子光学—冷原子专家法国科学院院士Alain Aspect教授在总结李丽Li_2分子光谱工作对冷原子物理贡献时说过“Li_2 is a Chinese woman from Tsinghua.”

2002年2月27日，原子分子和纳米科学教育部重点实验室召开学术委员会。与会人员合影前排左起：张德昌，庄逢源，李家明，邓寿鹏，张存浩，彭桓武，王大珩，杜祥琬，程开甲，金国藩，姚骏恩，王占国，李家熙；后排右4起：季梁，陈飚延，蔡恒源，马万云，白净，李衍达，莫宇翔，张新荣等

从建激光单原子探测实验室初期始，王大珩即以其对新生科学事物敏锐的洞察力很快给予积极的反应和支持。以他在学术界的威望和影响力，联合德高望重的学者王淦昌、陈芳允、唐敖庆、师昌绪、林兰英、涂光炽、徐光宪、程开甲、张存浩等20余位院士专家组成一个学术顾问组和学术委员会，他亲自担任学委会主任。新世纪后，王大珩请杜祥琬担任学术委员会主任，王大珩任名誉主任。

1993年初，在呈上实验室“调研报告”时，王大珩与陈芳允两位院士一起向江泽民写了信，指出“这是从原子结构的认识走向直接操纵原子为我所用的一项重大突破，预见这项技术的发展，将对分子电子学、微观化学反应、生物分子工程以至微观型能量转换机制都会产生重大的影响。世界各科技先进国家都已将发展这项技术列入优先发展规划。我们深感我国也必须尽早开展这方面工作的迫切性，人家飞速发展，我们若不尽快追上去，以后就会是望尘莫及”。党和国家领导人十分重视，江泽民同志作了重要批示指出：“关于基础研究、应用科学与开发的关系，我们的方针已定，即‘稳住一头，放开一片’。当今科学技术发展十分迅速，我们对于前沿科技项目要有所赶、有所不赶。一旦突破可带动新产业革命的项目，就应该赶。王大珩、陈芳允二位学部委员的报告请认真研酌”。此批示在全国科技界广为传达贯彻，影响十分深远。相关学术界在全国范围组织了两次香山科学会议和三次关于此学科发展的学术讨论会。1996年3月，根据学者专家广泛深入的讨论研究，8位院士进一步形成题为《将单原子、分子测控科学技术纳入国家基础性研究规划》的学科发展建议报告。温家宝对此报告的批示指出：“原子、分子级探测、操纵与控制是一项战略性的基础研究，也是一项可以带动新产业的关键技术，应当统筹规划、选择重点、集中力量，予以支持”。据此，王大珩与唐敖庆、陈芳允和涂光炽几位院士联名建议“从速建立起《单原子分子测控科学与技术基础科学研究中心》作为‘九五’规划中建立若干个基础性研究中心的一项主点”，并强调指出，此学科领域是“势在必为，势在必赶，而且时不可待，在当今激烈的国际竞争中稍有延误，都可能形成落后，势难再赶上的局面。”

1990年代初期，国家教委特批“激光单原子探测实验室”为委属“激光单原子探测开放实验

2012年8月28日，“清华大学—创律前沿科学研究中心”揭牌仪式(左4为香港创律集团董事会主席徐增平)

室”。90年代中期，实验室根据前述形势发展，易名为教育部部属“单原子分子测控开放实验室”。90年代末期，再次更名为“原子分子纳米科学教育部重点实验室”。

激光单原子探测实验室的研究获得了多项国家奖项。包括国家“七五”科技攻关重大科技成果奖(由国家计委、国家科委、财政部联合颁发)(1991年)：“激光单原子探测技术在地质找矿中的应用研究”；国家“八五”科技攻关重大科技成果奖(由国家计委、国家科委、财政部联合颁发)(1996年)：“冲绳海槽中部和钓鱼岛附近海域勘查”；国家教委科技进步一等奖(1995年)：“原子(分子)层次的超灵敏谱学(及应用)与原子分子高激发态谱学研究”；国家教委科技进步二等奖(1991年)：“激光单原子探测超灵敏谱学及其应用研究”；教育部科技进步二等奖(1999年)：“极细微尺度(单个原子、分子直至纳米粒子)超灵敏谱学及其应用”；北京市科学技术二等奖(2002年)：“原子分子测控的基础研究”等。多年之后陈飚延教授发展的深海探油专利，促成了徐增平先生捐款物理系成立“清华大学—创律前沿科学研究中心”，这对新物理楼的建设起到了推动作用。[1]

1997年李家明院士调入物理系，学校成立了“单原子分子测控研究中心”，李家明任中心主任。为与实验室一致，中心后更名为“原子分子纳米科学研究中心”。该中心和实验室平行，实验室的大部分教师也成了中心的成员。同时中心也吸收了其他学科如凝聚态物理和光学方向的教师如顾秉林、范守善、陈皓明、朱嘉麟、李师群、龙桂鲁等成员，长期追求围绕着原子、分子层次的超灵敏探测、超灵敏识别、操纵和控制的科学目标。中心致力于推动学科交叉，在后续的发展中帮助有关院系稳定年轻人才，吸引到物理系(郭继华、马万云、薛平、倪军、莫宇翔、薛其坤、王向斌、王力军、王亚愚、戴星灿)、化学系(张新荣、李亚栋、李景虹)、工物系(程曜、鲁巍)以及中国工程物理研究院北京计算科学研究中心高翔等教师加入。

自此，物理系原子分子学科迅速发展起来，成长为一个有特色的理论与实验研究紧密结合的原子分子物理基础研究基地。新世纪之初清华大学“原子分子物理”被教育部评定为重点学科点。进入21世纪，物理系以原子分子纳米科学教育部重点实验室为重要基础，再进一步整合凝聚态物理和AMO学科的研究力量，向科技部申请并成功获批，建立了清华理科第一个独立的国家重点实验室——低维量子物理国家重点实验室。

2 光学学科

1982年复系之前，物理教研组中光学，特别是激光方面的研究，已达到相当高的水平。研究成果获得过多次奖励：1978年高功率氦氖激光器、空阴极氦镉激光器、双频激光干涉仪三项获全国科学大会奖；1980年自动补偿双频激光干涉仪与双频(塞曼)激光器两项获得北京市科技成果一等奖。当时物理教研组内光学和原子分子物理方面较大的科研小组有红外激光与同位素分离组、激光光谱组、配合激光器研究的镀膜组，另有光学加工组和激光车间等，为招收和培养光学学科的本科生和研究生做好了准备。1981年国务院学位委员会批准第一批硕士博士学位授予点，光学学科是首批被批准的光学硕士点、光学博士点(首批博士生导师是孟昭英、徐亦庄，而后1984年特批张培林)。清华大学第一位理学博士欧阳钟灿(现为中国科学院院士)于1984年在光学博士点通过答辩，获得博士学位，导师是徐亦庄，副导师是谢毓章。

近代光学教研组的基本力量来自当时物理教研组的激光光谱组、镀膜组、光学加工组和激光车间。激光光谱学研究在清华由张培林、赵朔嫣始于1979年，最初的工作是在所研制成的可调谐单纵模稳频和氮分子激光泵浦染料激光振荡器、放大器的基础上进行饱和吸收光谱与光电流光谱研究，后来发展到激光感生荧光、非线性四波混频和多波混频、相干反斯托克斯拉曼光谱、真空紫外相干辐射产生等的研究。近代光学教研组还开展了光学薄膜研究、大功率He-Ne及多种金属蒸汽激光器研制和激光应用研究。1986年，原子分子物理教研组和近代光学教研组合并成近代光学教研组，对准光学领域的主流方向，合并后发展了例如非线性激光光谱等研究。同时保持重视教学和重视培养学生的传统，进一步完善本科生、研究生的培养体系。到1991年国家学位培养工作评估时已培养出6位光学学位博士：欧阳钟灿(1984)、马万云(1987)、李复(1989)、刘国军(1990)、宗明成(1990)、衷庆华(1991)。借鉴国外一流大学的经验，逐步精缩规模，形成主要由各位教授的研究组组成学科的格局。当时的研究室有：非线性激光光谱研究室、原子分子研究室、光学信息处理研究室、激光器件研究室、光学薄膜研究室等。近代光学教研组的历届主任是：赵钧(1986—1989)、郭建生(1989—1992)、赵钧(1992—1994)、李师群(1994—1999)。到1999年学校撤销教研组建制时，光学学科还增加了量子光学、近场光学和微区光谱纳米材料、全固化激光器研究等新的研究方向。其中量子光学方面的研究由李师群始于1984年，涉及超辐射、光子回波、非经典光非线性光学等，并于1989年在清华开出“量子光学”研究生课程；近场光学和纳米材料由赵钧、孙家林开展，涉及近场光学显微镜、纳米材料制备和微区光谱研究等；全固化激光器研究由吴念乐、李师群等开展，涉及自调Q、盘片激光器等。在这期间非线性光谱组的研究成绩突出，原子的多波混频和多光子感生荧光检测获1991年国家教委科技进步奖(甲类)二等奖。到1999年又培养出6名博士：张健(1992)、吴小光(1993)、周义东(1994)、薛平(1994)、王刚(1997)、吕亚军(1998)。研究方向后来又进一步拓展到包含量子光学与原子光学、近场光学和微区光谱、全固化激光器物理、超冷原子导引、超冷原子体系的量子效应、光子晶体、量子左手特异材料和量子信息等方向。

1998年夏天，陈皓明组织了物理系和计算机系青年教师研讨和布置量子计算机的研究工作。陈皓明和龙桂鲁起草了在清华大学开展量子计算机研究的建议，提交给学校学术委员会和梁尤能副校长。1999年李师群受邀中国高等科学技术中心主持了WL (Laser Cooling: Bose-Einsten Condensation and Atom Laser) workshop，对国内开展超冷原子研究起了积极的推动作用。[2]

3 原子分子与光物理所(AMO所)

1999年10月，由“原子分子和纳米科学教育部重点实验室”和“近代光学教研组”组成系属“原子分子物理与光物理研究所”，简称AMO所，李师群任第一任所长(1999—2011)。[3]

2000年12月我们与北京大学联合成立“量子信息与测量教育部重点实验室”，龙桂鲁、李师群任实验室副主任，以及清华大学分实验室的主任、副主任。清华大学分室包括量子计算机与量子通讯、量子光学与原子光学、量子信息材料、超导电子学等研究组。[4]

2000年引进的莫宇翔成功研制了利用两束脉冲激光四波混频产生XUV激光和离子成像的具有国际先进水平的实验装置，研究了许多重要小分子的高分辨离子光谱、以及分子离子对光解、小分子光解的光谱及动力学等。最近他们又成功研制了国际上第一套具有亚微米空间分辨的真空紫外激光溅射质谱成像装置。宁传刚主要从事电子动量谱学和高分辨负离子光电子谱学研究。他们最近利用慢电子速度成像和冷离子阱方法精密测量了30多种元素的电子亲和势，并发现钍负离子(Th^-)可以被激光冷却。

2002年李师群作为课题负责人参加郭光灿院

士牵头的973项目“量子通讯与量子信息技术”(2002—2007)。2006年李师群进入科技部“量子调控”专家组，并作为首席科学家组织北京大学、中科院物理所、武汉物理数学所、浙江大学、北京应用物理所、上海交通大学等的同行申请科技部重大科学研究计划项目《玻色—爱因斯坦凝聚及BCS-BEC转变》。

龙桂鲁继任AMO所长(2011—2014)。龙桂鲁组在理论上开展了量子计算的研究，推广了Grover算法，还提出了一个零失败率的量子搜索算法，改进了Grover算法。在核磁共振量子计算机实验研究方面，龙桂鲁研究组是国内最早的3个研究组之一。他们先后实现了2—7个量子比特的核磁共振量子计算实验。同期还提出了利用分布式传输的方法进行量子通讯的思想，相关研究延续至今。他们进一步将其应用于量子密钥分配、量子秘密共享、量子直接安全通信。这些方案具有安全、容量高和高效率的优点。

在系里大力支持下，AMO所2003年引进蒋硕博士，从美国Arizona大学光学科学中心引进张卫平(量子光学理论，后转调华东师范大学、上海交通大学)。朱邦芬院士任系主任期间(2003—2010)，2004年引进的王向斌于2006年入职清华大学。作为量子密码诱骗方法主要提出者之一，在量子密码通讯方面的研究成绩突出。

王力军教授(2008)和尤力教授(2009)的加盟大大增强了AMO学科的研究力量，2013年又进一步引进了郑盟锟教授，2017年引进了刘永椿教授；在王亚愚任系主任期间(2017—2022)，2019年引进了陈文兰、胡嘉仲、杨鲁懿，以及熊启华教授。2021年引进了长聘副教授缪海兴和金奇奂教授，2022年引进了青年教授丁世谦。

王力军教授组织团队开展精密测量的研究，主要从事精密测量和计量前沿技术研究，包括绝对重力测量、光钟、原子钟、小型化离子钟等方面。2009年1月由清华大学和中国计量科学研究院共同建立精密测量联合实验室，王力军担任联合实验室主任。充分发挥清华大学和中国计量科学研究院的各自优势，努力创建具有国际水平的联合实验室。

尤力教授2009年入职清华，现任清华大学物理系原子分子与光物理研究所所长(2014—2022)，同时担任清华—北大—物理所2011协同创新中心“介观光学及冷原子研究”平台主任(2011—2022)。2013年，尤力与合作者(中科院武汉物数所蔡庆宇、张保成和詹明生)一起因在研究黑洞霍金辐射之间的量子关联的度量方面提出的一种能够诠释“黑洞信息丢失佯缪”的理论而荣获美国引力基金会的年度论文一等奖。2017年和郑盟锟合作领导清华团队成功地在实验上利用量子相变确定性地制备并甄别了至少含有910个原子纠缠深度的纠缠态，创造了在旋量原子玻色凝聚体中纠缠粒子数的世界纪录，该成果发表于*Science*杂志上，并获选2017年度科技部颁发的“中国科学十大进展”；2018年度获得清华大学“先进工作者”荣誉称号，同年AMO所量子光学与量子信息研究团队获清华大学“先进集体”荣誉称号。

随着全系蓬勃发展的步伐和杰出人才的持续加入，清华AMO学科正以重现辉煌的姿态迈入国际先进行列；目前在精密测量物理、量子通讯、量子计算与量子模拟方面已形成集合效应。有望将研究水平提升到一个崭新的高度，全面进入国际先进水平行列。

致谢 吴念乐、马万云、谢锋、张卫华、莫宇翔等老师对本文亦有贡献，在此一并致谢！

参考文献

[1] 部分内容摘自《清华物理八十年》书稿，清华大学物理系80周年系庆时，朱邦芬老师组织系里的老师们撰写. 时间节点是2006年

[2] 部分内容摘自《清华物理八十年》书稿，还结合了清华百年校庆专刊(2011)中李师群等撰写的清华大学物理系光学学科的科学研究的内容

[3] 组成过程在《清华物理八十年》中(p.242)有简述；“原子分子和纳米科学教育部重点实验室”的名称几经改变，在《清华物理八十年》中(p.238)有述；那时李家明院士的“原子分子探测科学技术中心”已存在，“原子分子和纳米科学教育部重点实验室”与“中心”的关系由双方说明

[4] 关于联合实验室的成立在《清华物理八十年》中(p.243)有简述