

DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2025.04.007

工程视角的量子光学研究 ——以彭堃堉院士及其团队为核心的阐释

厚宇德

山西大学 科学技术史研究所, 山西 太原 030006

摘要:1925年至1926年科学家建立了量子力学理论体系。一个世纪后的量子科技已经在众多领域发挥关键作用。“遇事不决量子力学”等等网络流行语的出现,说明量子科技的影响早已超越科技范畴;同时也说明大众对量子科技存在诸多想象与误读,有人将量子纠缠等现象与历史或生活故事结合起来,更使量子科技神秘化甚至迷信化。量子光学是以量子力学为基础的量子科技重要领域之一,通过阐释该领域研究的工程属性,可以帮助读者对这一领域的研究以及科学家在这个领域的艰辛探索,有深入的理解,有助于形成关于量子科技、关于量子科技研究更为正确的认识。

关键词:彭堃堉;量子力学;量子光学;量子态;工程学

中图分类号:O431.2; N09

文献标志码:A

文章编号:2097-1486(2025)04-0381-10

Research on quantum optics from the engineering perspective ——An interpretation centered on academician Peng Kunchi and his team

HOU Yude

The Institute for the History of Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

Abstract: From 1925 to 1926, scientists established the theoretical framework of quantum mechanics. A century later, the quantum technology has played a crucial role in numerous technological fields. The emergence of the internet buzzwords like "When in doubt, quantum mechanics" indicates that the influence of the quantum technology has long transcended the realm of science and technology. It also suggests that the public has many imaginations and misunderstandings about quantum technology. Some people combine quantum entanglement with historical or real life stories, further mystifying and even deifying quantum technology. Quantum optics is one of the important fields of quantum technology based on quantum mechanics. By explaining the engineering attributes in the research of this field, it helps readers gain a deeper understanding of the current research in this area and the scientists' arduous exploration in this field, and contributes to a more correct understanding of quantum technology and its research.

Keywords: PENG Kunchi; quantum mechanics; quantum optics; quantum states; engineering science

量子光学是以量子力学为基础而发展起来的、方兴未艾的物理学新领域。在中国改革开放后发展起来的与量子力学相关的研究领域中,量子光学成就尤为引人注目。在该领域的研究者中,彭堃堉院士是举足轻重的关键人物之一,其科研工作具有开创性作用。本文以彭院士及其团队的工作为核心,

揭示量子光学实验研究所具有的工程属性。

1 从研究内容看量子光学研究的工程属性

量子光学是应用量子力学理论研究光的辐射、传输、检测及光与物质相互作用的学科。工程学旨在将科学转化为技术,而人们提到“工程”一词往往

基金项目:彭堃堉院士学术成长资料采集项目(CJGC2021-K-Z-XH08)

收稿日期:2025-10-15; **修回日期:**2025-11-25

下意识地将其与“大”字联系起来。“两弹一星”、大加速器、太空与海洋探测等领域的科研固然是工程之典范^[1],然而人类对微观而复杂领域的探索,虽然设备与实验平台很多时候不像直径几千米的大型加速器那样壮观,但是同样也属于工程研究项目,如牛胰岛素人工合成、基因组以及纳米技术等研究。近年来引人瞩目的量子光学研究,尤其是量子纠缠态等研究也明显具有工程学特征。

量子光学领域的开辟与激光器的诞生密切相关,而激光领域的研究本身即属于工程研究。《激光工程》^[2]《固体激光工程》^[3]《激光技术与工程》^[4]《现代激光工程》^[5]等著作的名称已经清晰揭示了激光器研制和应用研究的工程学属性。现代激光科学的定义,则从激光科学所包括的具体环节本身,充分体现了该领域研究所具有的工程属性:“现代激光科学与工程是指与激光的产生、传输、交换、控制、应用相关的科学与工程”^{[4]1}。不仅整体而言激光科学是一门复杂的工程,其中涉及的每一个环节也堪称工程类研究,就制造激光环节而言,充满工程与系统性思维:“激光制造系统由激光源、传输、聚焦系统、运动与控制系统、传感与检测系统组成,其核心是光的产生、传播和操纵”^{[4]4}。周光召院士在2000年对于激光广泛而重要的作用有过这样的描述:“激光同人们的日常生活关系密切,像每天用的激光CD和光通信。激光对国防贡献最大。如果没有激光,两弹一星会有很大困难。激光产业应当成为中国高技术中最辉煌的一个部分……激光出来以后不仅改变了光学的面貌,而且改变了物理、化学、信息、材料各方面科学研究的状况。就拿物理来讲,这两年得诺贝尔物理学奖的人都同激光有极大的关系。没有激光就不可能冷却到那样的低温,就不可能实现原子相干态”^[6]。周院士讲的最后一句话,指的就是量子光学领域的冷原子研究。

除了激光器的研制和应用中的工程性,量子光学研究本身也是复杂的系统工程。《量子工程导论》^[7]《量子工程学》^[8]这类书籍名称也一目了然地体现了量子技术研究的工程属性。有著作认为量子工程技术是以量子力学、量子光学、量子信息学为理论基础,以量子逻辑门、量子磁力仪、原子频标、量子纠缠源、冷原子源、量子陀螺仪与重力仪等为量子器件与仪表,包括单光子激光通信系统、量子成像遥感系统、量子通信系统及网络等应用方向^{[7]前言:3}。按照这种说法,量子光学似乎是隶属于量子工程技术的一部分基础内容,然而深入了解量子光学研究机构的

具体研究工作不难发现,量子光学研究者几乎涉及量子工程技术名下的所有研究领域。因此,二者不是简单的隶属关系,也很难在实际研究工作中区别哪种属于量子光学研究、哪种属于量子工程技术研究;把它们理解为属于同一领域,但根据具体问题的研究方向会略有侧重应该还是比较准确的。这种难解难分也充分说明,量子光学与量子工程技术十分类似,充满工程学研究属性。

2 彭堃堦院士的重要研究领域

如前所述,激光在量子光学研究领域扮演着重要的角色。彭堃堦院士曾通俗地解释他所从事的研究工作:“我们正在寻找一种光,一种没有噪声、没有干扰、很安静的光,这种光可以测量很微弱的信号,可以测量很微小的物理量变化。其他学科做不到,只有量子光学才能做到”^[9]。彭堃堦院士的量子光学研究始于激光器研制工作,他在20世纪70年代出国深造接触量子光学前,已经积累了较为丰富的研制激光器经验:“(当时)一般人是不大会做(激光器)的,而我有做三年车工的经验。实验室缺少经费,买不起高级设备,只好自己动手去做。我自己设计并亲自加工,给大家作示范,还手把手教学生”^[10]。彭堃堦1981年出国,先后到法国、美国访学,1984年回国。在国外访学期间,他在国内研制激光器的经验发挥了重要作用:“我在国外实验室工作时,他们的激光器就是由我设计的,也是由我组装调试的”^{[10]12}。而他在国外独立创建量子光学实验室的经历为他回国后自己从零开始打造量子光学实验基地,积累了宝贵的经验:“我回国后兴建的第一个车间就是机加工车间,正是由于我对做激光器有过自己的体验,才为后来做新的研究打下非常好的实验基础,我们现有的激光器制作就是在机加工基础上发展起来的。从那以后,学生和老师都知道需要什么就自己去做什么,并且我们能做很先进的激光器”^{[10]12}。回国后经过多年努力,正如《郭光灿传》所说:彭堃堦最早“成为当时国内唯一有条件能大规模从事量子光学实验研究的人”^[11]。2003年彭堃堦当选为中国科学院院士。

美国著名物理学家、彭堃堦在美访学时的导师Jeff·Kimble(1949—2024)教授曾高度赞扬彭堃堦当年研制激光器所取得成果的重要性:“你经过奋斗在我实验室完成了第一台Nd:YAG稳频激光器,它导致了第一个压缩态实验的完成”^[12]。这里提到了彭院士的第一个重要研究领域即单频稳定输出激光器

研究,准确地说是非经典光场产生系统泵浦源的研发。这个方向也是彭院士开启自己第二个重要研究领域即光场压缩态研究的基础。2025年1月3日王军民教授在接受采访时说:“彭老师84年回来后主要研究方向之一是光场压缩态,这个工作太复杂了,当时在国内别人都不敢碰。”经过压缩态实验而产生的非经典光场的光子间才能实现量子纠缠,从而拓展量子光学研究。1992年彭堃堉团队在国内首次完成了正交双模压缩真空态光场产生实验,彻底掌握了光场压缩尖端技术。中央电视台于该年3月曾报道这一科研成果(见图1)。

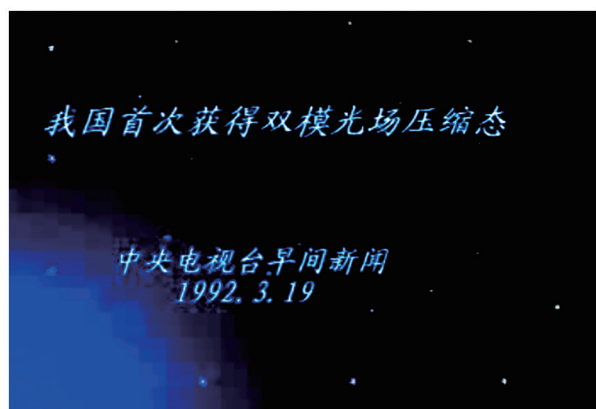


图1 中央电报道彭院士团队光压缩态研究成果剪辑图^①
Figure 1 CCTV reported on the achievements of the light squeezed state by Academician Peng's team^①

彭堃堉团队在高品质激光器研制领域,技术不断升级,2002年成功研制出全固态大功率(5瓦级输出)单频连续波绿光激光器(见图2)。2014年彭堃堉院士的科研团队成功研制了压缩态光场发生器(见图3),可以便利地产生所需要的压缩光。彭堃堉院士之所以在这两个方向上独立研究、打下坚实基础并持续开展研究,是因为量子光学研究广泛需要压缩态光源,而高性能激光器产生的激光又是光场压缩态研究的基础。因此,如果在这两个方向没有科研自主能力,则研究工作将无法避免地受制于人。

立足自己奠定的量子光学实验研究基础之上,彭院士及其团队开展了量子光学一系列重要领域的研究工作。彭院士的能力、天赋及成就得到了业内同行的高度赞许。1989年他在Kimble团队的EPR(Einstein-Podolsky-Rosen)实验探索研究中曾发挥重要作用。1998年Kimble教授致函彭堃堉时指出:

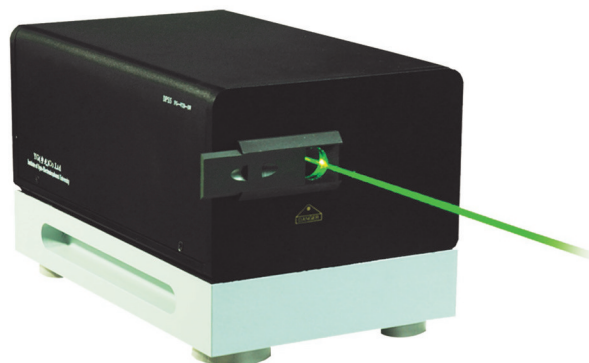


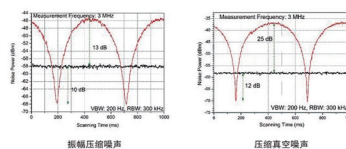
图2 全固态单频连续波绿光激光器(5瓦级输出)
Figure 2 All-solid-state single-frequency continuous-wave green laser



压缩态光场发生器

压缩态光场发生器是集基波和二次谐波波长相输出的连续单频激光器、光学参量放大器(OPA)与平衡零拍探测器为一体,直接产生单模压缩光场,并能通过所用的探测系统定量测定压缩度。该压缩态光场发生器可用于量子信息及量子测量领域。

型号: CV-squeezer (1064nm);
振幅分量压缩度: >12dB;
输出压缩态光场波长: 1064nm;



研发进展



YuGuang Co., Ltd.

太原山大宇光科技有限公司 山西大学光电研究所
YuGuang Co., Ltd. Institute of Opto-Electronics, Shanxi University
联系人: 苏静 电话: 0351-7037821

图3 压缩光场发生器

Figure 3 Squeezed light field generator

“没有你在我研究团队里竭尽全力而充满天赋的工作,EPR传送实验研究就不会取得丰硕的成果”(见图4)。

Kimble提到的EPR实验研究,指的是其小组利用参量转换的非线性光学效应实现了爱因斯坦、波多尔斯基和罗森做过理论探讨的连续变量EPR态。孙昌璞院士等人在文中提到彭堃堉和欧泽宇是Kimble小组1992年EPR实验小组主要成员^[13]。事实上这一合作的情节要更加复杂。彭堃堉1988至

① 源自中央电视台报道视频画面截图。

Dear Professor Peng,
Thank you very much for your kind words. Of course the research that made the teleportation experiment possible was the EPR experiment that you, Silvania, Jeff, and I did many years ago (and which is cited in the Science article). Without your dedication and talents working with my group both in Texas and here, the teleportation experiment would never have come to fruition. The greatest pleasure and honor of my career has been and remains the opportunity to work with and to know people such as yourself and Changde. I too hope that I will be able to return to China for a visit after my long absence.
With my best regards,
Jeff

图4 Kimble教授致彭院士函(山西大学光电所提供)

Figure 4 A letter from Professor Kimble to Academician PENG (From Institute of Opto-Electronics, Shanxi University)

1989年第二次到Kimble处访学时,已经与Kimble的博士生S. F. Pereira一起用1 064 nm激光和双KTP晶体首次观察到一对偏振非简并下转换光之间的非经典关联。不过当时他们还不能肯定这个结果证实了EPR佯谬。1989年6月Kimble在学术会议上宣读了他们的实验结果,相关论文收入1990年出版的第六届Rochester会议论文集中^[14]。正是在这次会议期间,Kimble等经过与Mandle教授讨论,才最终肯定这一实验具有连续变量EPR态之意义。1989年底彭堃堦回国,而孙院士等人文中所引Kimble小组的文章,实质是彭堃堦回国后,Kimble与他的博士后欧泽宇等人所完成,实验利用了1 080 nm激光和单块 α -切割KTP晶体。因为该实验本质上是彭堃堦及S. F. Pereira此前所做实验的重复,因此彭堃堦虽未直接参与第二次实验仍被列为作者之一。值得注意的是,彭院士在致孙昌璞院士函中特别指出,1989年他们在美国做实验时所用的KTP晶体是我国山东大学晶体研究所制造的产品(见图5)。

经过多年的拼搏创业,彭堃堦院士的科研团队为我国建成了完备的量子光学实验研究基地。2000年,山西大学量子光学实验室被评为教育部重点实验室。2001年10月,科技部正式批准在山西大学建设“量子光学与光量子器件国家重点实验室”,并于次年12月通过验收。2025年该实验室经调整,更名为“光量子技术与器件全国重点实验室”。作为同行,中国科学院孙昌璞院士2024年9月13日在访谈时评价说:“彭堃堦院士在建设量子光学实验室过程中,体现出了战略科学家的眼光,建成了该领域完整的、全链条的国际上最好的同领域实验室”^①。对于孙院士的评价,山西大学张靖院士有如此解释:“完整的、全链条应该是指我们既重视基础研究、也

重视应用研究和产品开发;而‘最好的’也应该包括肯定我们的研究方向与课题选择富有特色的寓意。”几十年来山西大学量子光学团队在量子光学与量子信息、超冷原子与分子物态调控、量子精密测量与传感、量子材料与光量子器件等领域,开拓创新,取得了一系列标志性重要成果(见图6)。

卢华东是一位80后博导,他从读研究生时开始即与彭院士处于同一实验室,是仍在彭院士开辟的研究方向从事探索的教授之一。在2025年4月16日的访谈中,他对自己每天夜以继日的研究状态的描述,有助于我们更加深入了解,以激光器为核心的量子光学研究者科研过程的艰辛以及科研本身所具有的工程属性。卢教授对他和同事们每天工作的描述轻描淡写:“老师和学生均需要在8点前进入实验室工作。在进入实验室之前,要更换成洁净服,还需要进行风淋,把身上的灰尘尽可能清除掉。进入实验室后,首先是调试激光器。激光器的调试有一套程序,在按照程序规范操作的基础上,还需要不断观察和思考。随着需求的不断提高,我们重点是探索新的技术和方法来提高激光器的性能和指标,还需要不断研发新种类的激光器。在一天的实验结束之后,通常在晚上整理数据,并根据当天的研究进展计划、设想第二天的研究工作和研究内容。”事实上他们每天都需要绞尽脑汁、全神贯注于实验过程,他对夜晚离开实验室后精神状态的描述,告诉我们,这种对于实验研究的聚精会神是全天候的:“几乎每天都是在夜深人静的时候,我们才结束一天的工作,离开实验室。但是工作并未停止,回到家里、躺在床上脑袋中萦绕的依然是白天实验的场景。大多数好的解决办法,正是在这样似睡非睡的状态下想出来的。”

① 本文中未标明出处的引用,均源自访谈录音。

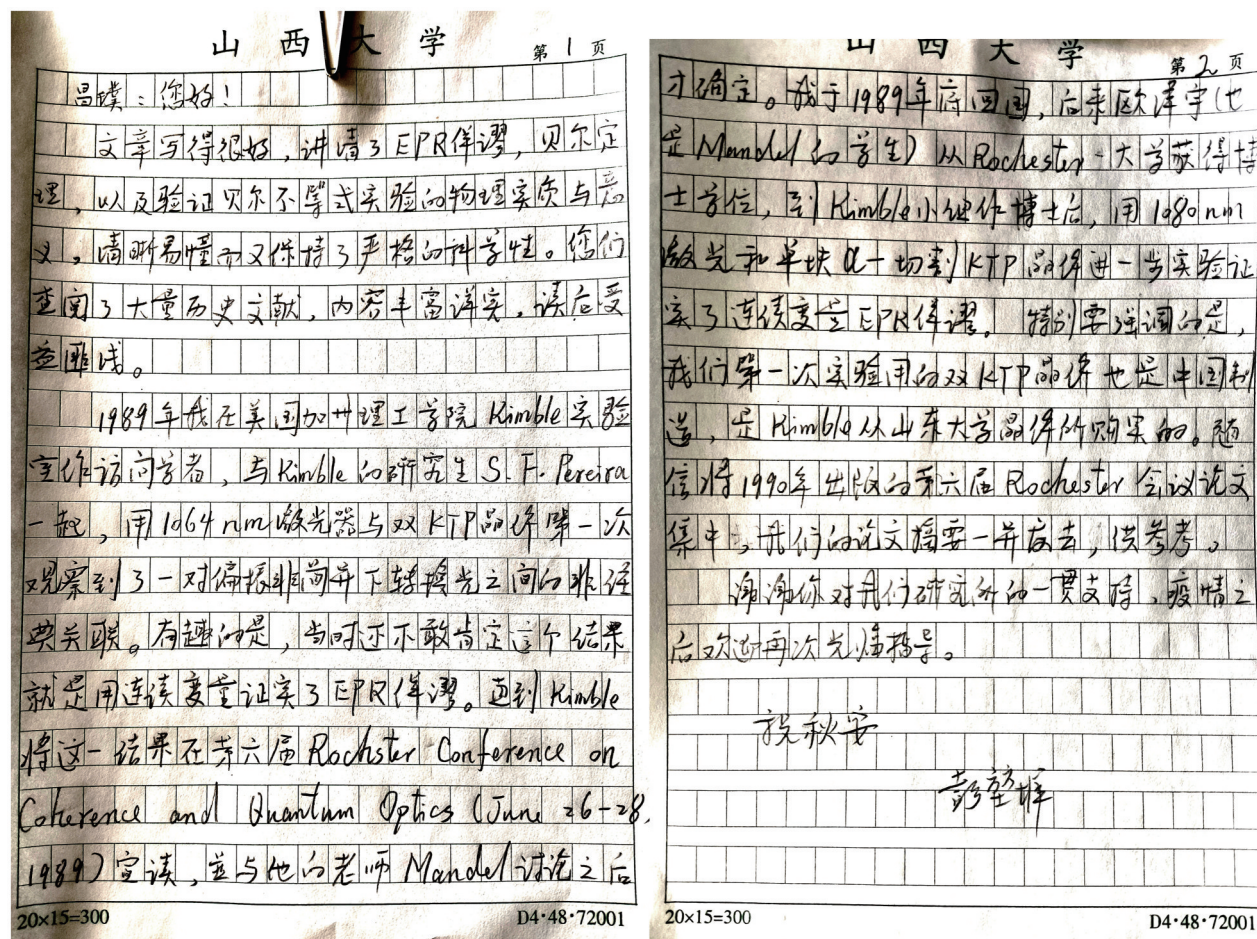


图5 2022年彭院士致孙昌璞院士说明其参加连续变量EPR佯谬实验函^①
Figure 5 A letter from Academician PENG to Academician SUN Changpu^①

他们重要的成果就是在这样夜以继日、不惧困难的开拓创新中,点滴结晶而出的:“正是在这样日复一日的工作中,我们取得了一系列成果。我们发现了利用非线性损耗提升激光器整体性能的技术和方法,利用该技术一举将我们的激光器提升到百瓦量级,不仅彻底打破了国外技术垄断,而且为实现关键仪器的自主化和国产化贡献了我们的力量。我们开展的全固态单频连续波宽调谐钛宝石激光器研究工作,填补了我国在该产品领域的空白。我们不仅建成了国际上具有影响力的全固态激光器研究室,而且建成了功能齐全、设备完善的激光技术研制平台、电子技术研制平台和精密机械加工平台,形成了光机电一体化高度融合发展模式和产学研用深度融合的人才培养模式。到目前为止,我们已经有130多台激光器产品被国际、国内的众多单位使用,受到了广泛好评。”

3 量子光学其他研究方向专家对量子光学研究之工程性特征的描述

其他方向量子光学研究所具有的复杂工程属性同样明显,甚至更为显著。这些领域研究者对于自己工作特征的描述,能够恰当引导读者深入理解量子光学研究的工程属性。在这一环节,除了基于山西大学光电所研究者的访谈资料外,笔者也以开放的心态引用国内其他院校相关领域研究者对于其工作的说明。这样既有利于传播这些科学家对自己前沿工作的精彩阐释,也能在更大的范围让读者领略我国量子光学领域研究的可喜面貌。

3.1 量子计算机研究与工程研究有很大耦合

量子计算机是量子光学的科研领域之一。该领域的研究者、中国科学技术大学龚明教授说:“我们大部分的时间都是在实验室里泡着……在实验室里,最主要的时间是花在超导量子计算机上,第一个是对线

① 此函为彭院士口述、谢常德教授笔录。

最具有代表性的论著目录

1. “Frequency-stabilized Nd:YAG laser with high output power ” ,
Appl. Opt. , Vol. 24, No. 7(1985)p. 938
2. “双模光场压缩态的实验研究” ,
物理学报, Vol. 42, No. 7(1993)p. 1079
3. “Realization of the Einstein-Podolsky-Roson for continuous variables” ,
Phy. Rev. Lett. , Vol. 68, No. 25(1992)p. 3663
4. “Nonclassical properties and comparison of two-squeezings” ,
Science in China(Series A),
Vol. 37, No. 2(1994)p. 227
5. “A full quantum theory of the three-mode interactions inside an OPO cavity” ,
Acta Physica Sinica(Overseas Edition),
Vol. 1, No. 2(1992)p. 94
6. “Back-action-evading measurement via nondegenerate optical parametric down-conversion in a ring cavity” ,
Opt. Commun. , Vol. 102(1993)p. 491
7. “Experimental observation of optical bistability based on self-defocusing” ,
Optics and Quantum Electronics,
Vol. 19, No. 5(1987)p. 268
8. “Increasing absorption optical bistability operating in the front surface layer of high absorption samples” ,
Appl. Phys. B, Vol. 51(1990)p. 215
9. “CW Nd:MgO:LiNbO₃ self-frequency-doubling laser at room temperature” ,
IEEE Journal of Quantum Electronics,
Vol. 29, No. 9(1993)p. 2419
10. “全固化 Nd:YVO₄ 单频绿光激光器” ,
中国激光, Vol. A21, No. 8(1994)p. 617

图6 彭堃堃院士10项代表性成果^①

Figure 6 The list of 10 representative achievements of Academician Peng Kunchi^①

路进行安装和测试。因为我们实验室的制冷机非常庞大,内部的线缆可能有几百路,总的数量可能有数千条,都需要逐一仔细调整检测。安装调试之

后,大部分时间是进行量子处理器的设计和制备,以及最后的测试。通常情况下会有半年到一年的时间是需要实验室里不断地进行量子处理器的测试。

① 源自山西大学光电所提供的彭堃堃院士评选材料。

其实现阶段,特别是在超导量子计算领域,很多任务已经跟工程有非常大的耦合。因为现在的科学更多是需要借助一个非常庞大、非常先进的设备。大部分情况下工业厂商是不愿意去制造这种设备的,我们需要自己去做设备开发,从每一个零件的设计开始,到量子处理器的调试,到软件怎么编写等。每一项单独看,都是一个非常工程化的任务,我们最终要把这些工程化的碎片拼成一个非常大的科学装置,然后去研

究科学问题”^[15]。量子计算机研究很多任务已经与工程有非常大的耦合,研究者把诸多工程化的碎片拼成复杂的科学装置,相关研究的工程属性极为明显。

量子光学实验平台虽然大体就如同一个实验桌面大小,但其结构之复杂超乎常人所能想象。图7是山西大学王军民教授团队铷原子D1跃迁线波长处的偏振压缩光源示意图,图8是该团队所做铯原子单步里德堡直接激发的318.6 nm紫外激光系统示意图^①。

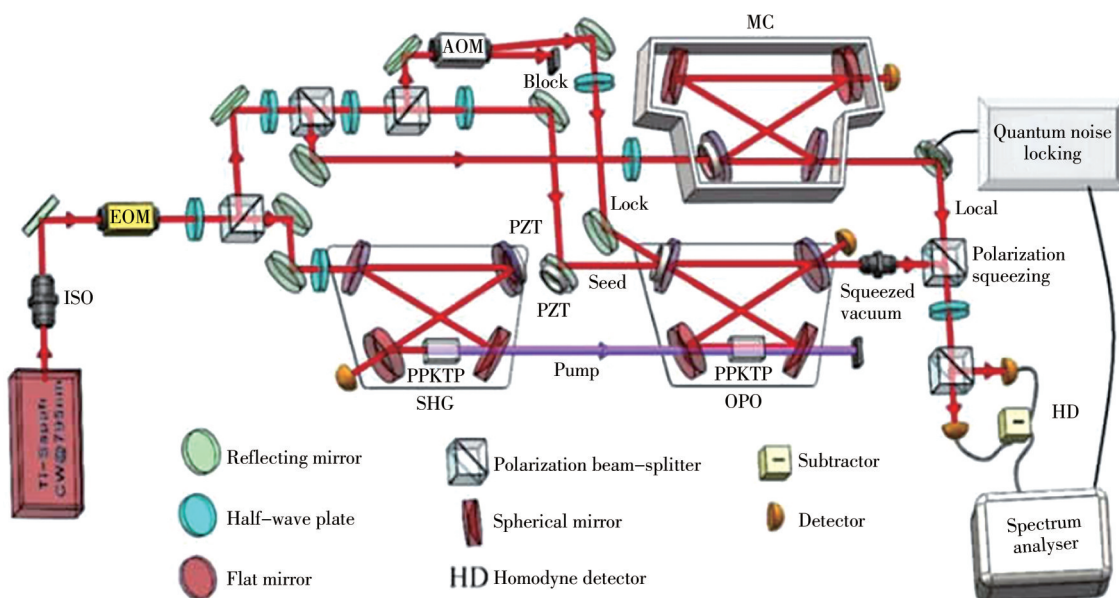


图7 铷原子D1跃迁线波长处的偏振压缩光源示意图^①

Figure 7 Schematic diagram of the polarization squeezed state light source around Rubidium atomic D1 transition line^①

这两个简图可以帮助读者对量子光学实验设备之复杂有初步的感受。

3.2 量子光学研究是大量设备元器件的系统工程性协作

量子光学实验研究要精密调试、有效控制上千个设备、元器件,并使之协同运作,达到预设的苛刻条件,最终实现预期目标。中国科学技术大学另外一位教授姚星灿对此有细致的说明:“我们通常会把时间分成两部分,一个部分占2/3,我们叫作benchwork,就是我们在实验平台上对各种各样的激光,射频微波场、电流磁场等进行一些精密的调控和调试。另外1/3的时间我们就会回到计算机前,通过我们的程序来控制我们实验室上千种的设备、元器件,把它们协同起来,实现原子的冷却操纵、囚禁与探测的一个全过程。以天元号为例,反铁磁相或者叫作反铁磁态实现条件苛刻。第一要求每个槽均

匀,对于原子来说要一模一样的,只有这一条件被满足之后,才能够展示出这些原子的全同性质。第二是温度要非常低,低到原子在不同格点之间跳来跳去的过程被抑制。我们做实验的时候非常困难,事实上,我们可能前前后后花了快10年的时间,直到去年我们才真正地达成均匀性和低温两个条件。第一次达成了这两个条件的时候,我们感到非常幸福,原子完全的按照理论所预言的交错排列这么排布起来了,我们真正的可以看到量子的效应”^{[15]40}。

黄良辉是山西大学工作于冷原子研究领域的年轻教授之一,是彭堃堉院士的隔代弟子,他对自己从事领域的研究工作有如下描述:“作为一个量子光学领域科研工作者,我深深地体会到‘为了科研享受孤独寂寞’的真正含义。自从读研以来,在导师张靖教授的带领下我们这个课题团队成员近二十年如一日,坚守科研一线。在我们的研究领域,超冷原子系

① 图7、图8来自山西大学光电所网站:<http://ioe.sxu.edu.cn/newlab5/%E7%A0%94%E7%A9%B6%E6%96%B9%E5%90%91.html>

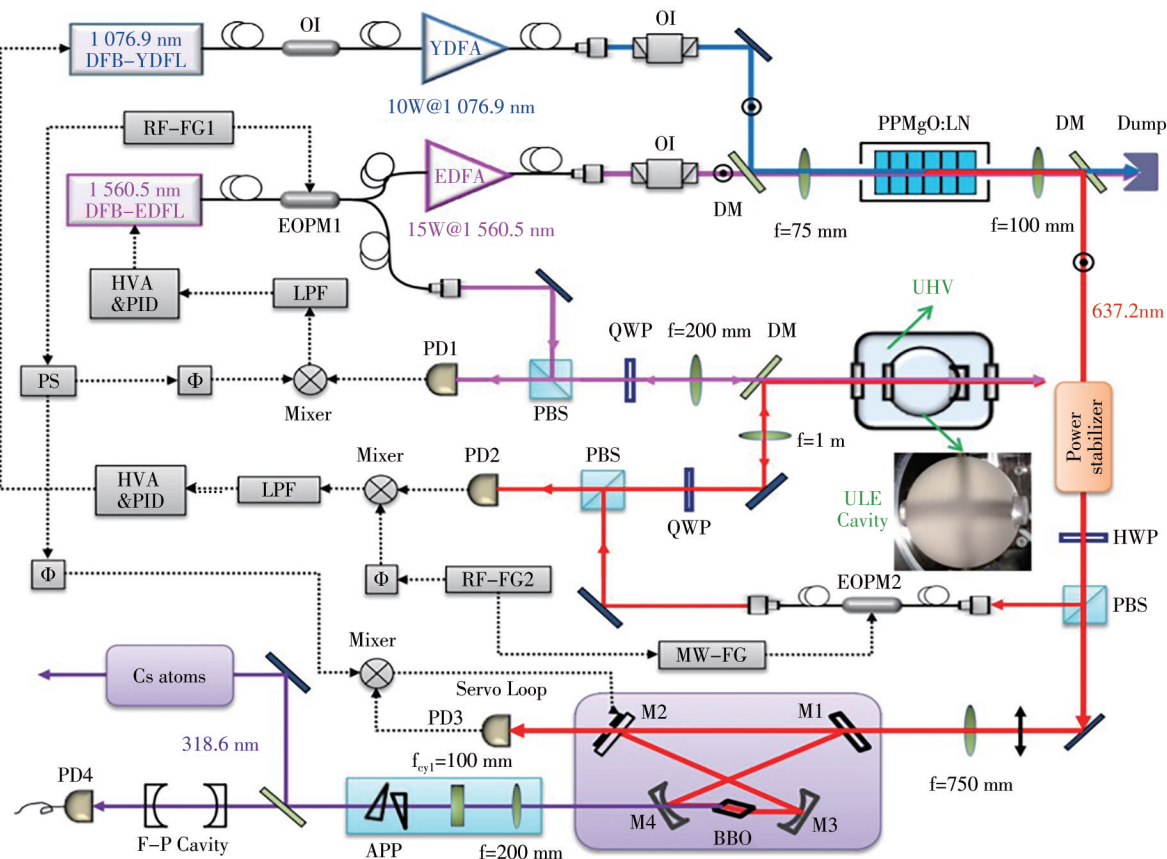


图8 铯原子单步里德堡直接激发的318.6 nm紫外激光系统示意图^①

Figure 8 Schematic diagram of the 318.6 nm ultra-violet laser system for single-step direct Rydberg excitation of Cesium atoms^①

统相当于一个量子模拟器,是由上千个光学部件和电子元器件一个个搭建起来的。看起来独立的电路和光路都是相互关联、相互影响的,所以为了系统的稳定性各环节之间的每一步都需要仔细优化调节。一个不起眼的焊点或者很微弱的杂散光都会导致各种意想不到的‘大问题’。这就要求我们和其他所有的科研人员一样,必须注重实验过程中的每一个细节,不放过任何一个疑点,找到每一个异常现象的原因,在一大堆噪声中找到实验信号,对系统中每一个器件、每一个步骤都做到精益求精,做到极致。所以我们的主要任务就是全天候‘伺候’实验系统,攻克一个又一个实验难题,保证实验系统的正常运行,零零散散要将近一半的工作时间用于在实验室和学生们一起解决问题、讨论方案,完成课题。”

黄良辉教授基于自己的科研实践经验,特别谈到了实验系统的一些非正常状态,一旦进入这种状况,要花费很多时间,才能回归正常科研:“在实验过

程中如果系统出大问题或者直接不工作是我们比较‘喜欢’遇到的难题,这种可以断定实验系统发生了问题,还不是最令人不愿意面对的,因为这类问题看似严重但只要从头检查起来,相对而言还是能够较快发现问题症结所在,而通过优化或者替换新的器件的方式解决;最惧怕的是实验系统进入‘半死不活’的非稳定运行状态。这种情况下往往会被认为是微扰使然,而让研究者意识不到系统已经出现大问题。因为意识不到出了问题,就会去做局部微调而继续勉强工作。经过很长一段时间发现始终无法稳定工作,才终于断定系统存在严重问题。这期间常徒然经历很长的时间,从工作的效果上看,这是无法避免的白白浪费时间的过程,很是令人沮丧。”

黄良辉教授谈到的复杂实验系统出现的这类特殊问题时,因系统貌似处于“绝症”与类似人体“亚健康”之间,没法断定处于不治状态,因而会期待它康复。在浪费足够时间后研究者才能逐渐醒悟。这种

① 图8来自山西大学光电所网站:<http://ioe.sxu.edu.cn/newlab5/%E7%A0%94%E7%A9%B6%E6%96%B9%E5%90%91.html>

科研困境的出现,仍然与实验系统是超复杂的一个系统工程直接相关。如若是一个较为简单的实验设备,研究者就更易于对它的状态尽快做出正确的估计和判断。

3.3 量子光学研究:依靠人为的脆弱量子系统突破极限、解决工程性大问题

量子光学实验研究所具有的极为突出的特征——人为产生的量子系统极为脆弱,但科学家却要基于对它的研究,实现追求极限的目标;要做到这一点,超常人的思考和实在的实验必须紧密配合,通过多种实验器件的工程化协作实现由思想到物质的转化。中国科学技术大学汪野研究员准确地揭示了其工作中的这些内涵:“我自己的经验就是,我们95%的时间都在拧螺丝,或者说测仪器设备、摆镜子,然后才是做实验的时间。因为量子系统它很脆弱,所以我们对于噪声控制是要求非常极限的,我们其实无时无刻不在跟各种各样的技术和噪声去搏斗,我们在不停地推进相关仪器的极限,操控量子系统的极限,为了能够精确地控制每一个量子的单个的体系,再把它组装起来做一个量子计算。我们思考的时候很多都是在思考大问题、量子的问

题,但我们真正在实验室里,大家天天干的就是拧螺丝、测数据、写代码。当然做这些工作都是为了朝着我们远大的量子计算或者量子模拟的目标在前进。这可能是我们真正的一个工作的状态”^{[15]40}。

李刚是山西大学从事腔量子电动力学研究的年轻教授之一,也是彭堃堉院士的隔代弟子。2024年10月15日他对自己从事实验研究有过这样的说明:“从激光器开始,量子光学实验装置一个环节接一个环节,非常复杂。需要买一些基本的光学器件,还需要自己研制一些买不到的器件,然后按照实验目的和思路把它们组合起来,成为一个复杂的实验设备,要让它正常工作,还需要不断改进和极为费时地去调试、优化。当这样复杂的系统出现问题时,因为它包括诸多环节,很难短时间搞清楚问题的症结所在。我们都是物理学出身,但都还必须得成为具备多面手类工程师,需要掌握机械、电、光、真空以及自动控制等多类知识和技能。我们的实验装置都是从无到有自己设计、部分制造器件部分购买器件然后搭建起来的。边做边学各种知识、掌握新技能需要时间,研制仪器需要时间,不断调试、优化需要时间,在反复实验中发现问题、解决问题、积累经验更需要时间。”他归纳性地阐释了该领域研究的工程属性与物理学前沿研究的依存关系:“我们研究的问题始于物

理学;最终输出的结果归于物理学。但是在问题与结论之间的过程,却与大多经典物理学实验过程区别甚大。实验系统的搭建以及实验器件的调控以及结果的输出和处理,基于机械、光电、控制等诸多现代工程方法之上。也就是说开始思考问题,以及分析最后的实验结果时,我们是物理学家,而在实验过程中,我们却像系统工程专家那样思考,并完全借用工程学的手段。我们的实验设备本身就是复杂组合、协调工作的系统工程设备。”

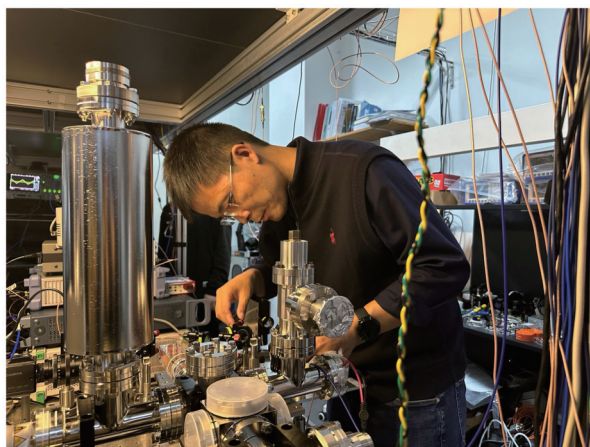


图9 正在调试仪器的李刚教授(2024年11月8日)

Figure 9 Professor Li Gang is debugging the instrument (2024-11-08)

工程学专家认为:“自然科学家的目标——发现什么是未知的,工程师的目标——创造什么是未有的”^[16]。如果从量子光学研究领域去看,这种说法就显得不够全面——量子光学是科学研究与工程研究交叉而彼此兼有的学科,它既创造未有的,更发现未知的。具体而言,量子光学的通讯类研究以应用为主,主要目标是创造前所未有的;而冷原子与腔量子电动力学等领域的研究,主要任务是发现和证实新的物理现象与属性,因而是发现和证实前所未知的。当然在发现前所未知之后,时机成熟亦会用于创造前所未有的。因此,工程学专家区分科学研究与工程研究的理念,对量子光学领域的研究而言,已经不再灵验、有效,在这一领域科学研究与工程研究不存在截然分开的边界。量子光学实验研究的过程是一项复杂的工程性攻关,量子光学实验研究所用的一些高要求元器件需要研究者自己设计、开发,量子光学研究实验设备需要物理、工程与控制等多领域知识和技术的合理交融才能有效工作,实验室实现的量子态极为脆弱,但量子光学科学家却要借助脆弱的人为量子态去不断接近和突破极限……这

一切都是摆在量子光学研究者们面前的实际困难,这也是量子光学研究更为重视团队协作的根本原因。正如彭堃堉院士所说:“好的事业没有好的团队不行,一个人不可能创造整个事业”^[17]。一定意义上,这是量子光学研究所具有的工程属性迫使科学家不得不采取的科研策略。在过去 40 余载的科研生涯中,彭堃堉院士量子光学团队锐意进取、成果丰硕,他们由技入道^[18],在科研选题、团队育人、科研战略战术、实验室管理等诸方面积累了丰富的经验与行之有效的方法,既往可敬、未来可期!

参考文献:

- [1] 王大洲. 中国大科学工程史[M]. 杭州: 浙江教育出版社, 2022: 8.
- [2] 中井贞雄. 激光工程[M]. 熊纓, 译. 北京: 科学出版社, 2002.
- [3] W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002.
- [4] 左铁钊. 21 世纪的先进制造: 激光技术与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [5] 朱林泉, 牛晋川, 朱苏磊, 等. 现代激光工程应用技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [6] 周光召. 激光产业应当成为中国高技术产业中最辉煌的一个部分[J]. 中国激光, 2000, 27(12): 1057. DOI: 10.3321/j.issn:0258-7025.2000.12.001.
- [7] 王增斌, 韩军海, 张国万. 量子工程导论[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2018.
- [8] 扎戈斯金. 量子工程学: 量子相干结构的理论和设计[M]. 金贻荣, 译. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2024.
- [9] 南菁. 彭堃堉: 科技报国的“追光者”[J]. 共产党员, 2022(17): 38-39.
- [10] 李和平, 牛永新. 信任: 事业成功的基石[J]. 山西教育, 2004(01): 10-15.
- [11] 星河. 郭光灿传[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 144.
- [12] 中国科学技术协会. 中国科学技术专家传略·物理卷 4[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2012: 276.
- [13] 崔廉相, 许康, 张芑, 等. 贝尔不等式的量子违背及其实验检验: 兼议 2022 年诺贝尔物理学奖[J]. 物理, 2023, 52(01): 1-17. DOI: 10.7693/w120230101.
- [14] PEREIRA S F, PENG K C, KIMBLE J. Squeezed state generation and nonclassical correlations in nondegenerate parametric down conversion[C]//Coherence and Quantum Optics VI. New York: Plenum Press, 1989: 889-890.
- [15] 墨子沙龙编辑部. 量子计算科学家实验室的日常[J]. 墨子沙龙·量子百年专刊, 2025(01): 40.
- [16] 欧阳莹之. 工程学: 无尽的前沿[M]. 李啸虎, 吴新忠, 闫洪秀, 译. 上海: 上海科技教育出版社, 2008.
- [17] 张静晖. 在追求真理的道路上前行: 记彭堃堉院士和他的团队[J]. 先锋队, 2006(11): 33-35.
- [18] 厚宇德. 由技入道: 技艺的内化与人性的升华[J]. 工程研究, 2022(02): 132-141. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.22051901.



厚宇德,男,博士,教授,博士生导师。中国科学技术史学会第 8、第 9、第 10 届理事。主要从事物理学史与中国古代科技文化研究,主持完成国家自然科学基金面上项目 1 项、教育部项目 2 项。在《自然科学史研究》《科学学研究》《自然辩证法研究》《自然辩证法通讯》《科学技术哲学研究》《中国科技史杂志》《科学文化评论》《物理》《大学物理》等期刊发表相关研究论文 160 余篇,出版《玻恩研究》《玻恩与哥廷根物理学派》《知识、技艺、理念:传承与反思》等 5 部著作。Email:hyd630418@sina.com

(责任编辑:彭 鹏)