

激光冷却气体原子研究的起步阶段^{*}

王育竹[†]

(中国科学院上海光学精密机械研究所 上海 201800)

摘要 文章记述了开展激光冷却气体原子研究的起步阶段,描述了推动文章作者从原子钟研究走向激光冷却气体原子研究的动力.在研究初期阶段,文章作者着重思考了激光冷却气体原子物理机制,如:积分球红移漫反射激光冷却气体原子的设想和利用光频移效应(交流斯塔克效应)激光冷却气体原子的物理思想.文章还描述了作者所在实验室用于激光冷却原子研究的原子束实验装置,并展示了几个物理实验结果.最后,文章还总结了经验和教训,深感起步艰辛和今日可贵,期盼光辉的未来.

关键词 激光冷却,光频移,光抽运,共振荧光

The beginnings of our research on the laser cooling of atomic gases

WANG Yu-Zhu[†]

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Reminiscences of the beginning of our research on the laser cooling of atomic gases are recounted, describing what motivated us to progress from atomic clocks to laser cooling. At the beginning, we pondered upon the mechanism of laser cooling, such as the cooling of atoms in red shifted diffuse light in an integrating sphere and using light frequency shifting (the A. C. Stark effect). A description of the atomic beam experimental equipment in our lab, which was used in laser cooling, is given, and some experimental results that we obtained are displayed. Finally, we summarize our experiences and lessons learnt. In looking back on our arduous beginnings, we cherish the present, and look forward to a bright future.

Keywords laser cooling, optical frequency shift, optical pumping, resonant fluorescence

1 引言

“激光”诞生已 60 年了,激光用于物理学研究的一个重要方面“激光冷却气体原子”也已诞生 30 多年了! 1997 年度的诺贝尔物理学奖授予了美国斯坦福大学的朱棣文(Steven Chu)、美国国家标准与技术研究所的菲利普斯(William D. Phillips)和法国巴黎高等师范学校的科昂·唐努吉(Claude N. Cohen-Tannoudji),表彰他们在激光冷却和捕陷气体原子研究中所做出的杰出贡献.随后,2001 年度的诺贝尔物理学奖授予美国科学家维曼(Carl E. Wieman)、康奈尔(Eric A. Cornell)和德国科学家凯特勒(Wolfgang Ketterle),表彰他们在实现玻色-爱因斯坦凝聚工作中做出的巨大成就.两届诺贝尔

物理奖授予给同一领域的两项成果,说明该领域是一个极其重要的研究领域.近 20 年来,“激光冷却气体原子”诱发了物理学多方面研究的迅速发展,如冷原子钟、原子干涉仪、冷原子(分子)物理、量子模拟、物理常数精密测量和基本定律验证等.一浪接一浪的研究热潮充分证明了“激光冷却气体原子”在科学技术发展中的重要价值和地位.它不仅开拓了物理学研究的新途径和新领域,而且为应用科学技术的发展奠定了坚实的基础,也将对 21 世纪科学与技术的进步带来深远的影响.“激光冷却气体原子”和“冷

^{*} 国家自然科学基金(批准号:19834060;10104017)、中国科学院基金(批准号:KJ CX2-W7-2)、国家科技部基金(95-Yu-34)资助项目

2010-11-03 收到

[†] Email: yzwang@mail.shenc.ac.cn

原子(分子)”相关的研究领域在我国也不断地发展壮大,很多单位已在冷原子(分子)物理、量子模拟、冷原子钟、原子干涉仪和量子信息存储等研究方面取得了令人瞩目的成果.特别是新一代华人科学家的参与,加速了我国冷原子物理的发展.可以预期,在不久的将来我国科学家将为世界科学技术的发展做出重大贡献.

2 激光冷却气体原子研究起步阶段的思考

30年过去了,我们这一代人从“激光冷却气体原子”诞生就与它结下了不解之缘.激光冷却气体原子研究在我国的起步并不晚,但前进却十分艰难.当时处于“文革”后期,科学研究尚处于劫难之中,国家封闭,信息不通,在相当长的年月里,“激光冷却气体原子”未能引起我国科技界的重视,也未得到相关领导的理解和关注.因而未能获得应有的支持,发展也就缓慢.回忆这段经历,我们有兴奋和喜悦,有失败和教训.往事清晰如故,记述昔日之艰辛,珍惜今日之可贵.

1975年,汉斯(T. Hansch)和肖洛(A. Schawlow)^[1],瓦恩兰(D. Wineland)和德默尔特(H. Dehmelt)^[2]分别提出了激光冷却气体原子的建议,其物理思想是:在光场与原子相互作用的过程中,由于动量的线性交换,形成了光的辐射压力,从而阻尼原子的热运动,降低原子气体的温度.这两篇文章提出了新的物理概念“激光冷却气体原子”,对我们产生了巨大的吸引力.因为,原子钟的稳定度和准确度受限于原子的热运动速度.如果能降低原子的热运动速度,那么原子钟的频率稳定性和准确度将会大幅度提高.“激光冷却气体原子”是提高原子钟性能的根本途径.从事原子钟研究的科研人员都会意识到“激光冷却气体原子”的重要学术价值,它提供了发展科学技术的绝好机遇,从而决定了我们这一代人的科研道路^[3].1976年,“激光冷却气体原子”研究在国际上尚不是热门课题,仅少数科学家对它感兴趣,在国内仅有中国科学院上海光学精密机械研究所和北京大学热衷于这项研究.当年,我们思考的问题是“如何能冷却气体原子?”和“如何能观察到辐射压力的作用?”.因此,我们痴迷地思考“激光冷却气体原子”的物理机制,同时不遗余力地去建立可进行激光冷却气体原子研究的实验装置.

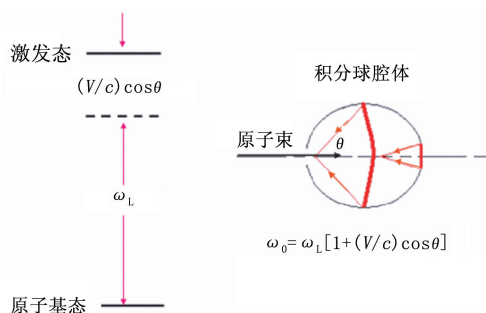


图1 积分球红移漫反射激光冷却气体原子(光在不同角度上与不同运动速度的原子产生共振.图中 V 为原子运动速度, c 为光速, θ 为原子速度与光传播方向的夹角, ω_L 为激光的圆频率, ω_0 为能级跃迁频率)

1977年,我在汉斯(T. Hansch)和肖洛(A. Schawlow)文章的启发下^[1],提出了几种与多普勒效应相关的激光冷却气体原子物理机制的建议^[4],如“积分球红移漫反射激光冷却气体原子”的建议,图1表示积分球冷却气体原子的物理思想.这种冷却原子的物理机制属于多普勒冷却机制^[5]:它是利用积分球内的红移漫反射光与原子发生共振,原子受到共振光压的作用,不断地减慢原子的运动速度,从而使气体原子冷却.由于实验条件的限制,直至1992年我们才进行了积分球红移漫反射激光冷却原子束的实验,获得了预期的结果,证明了物理思想的正确性^[4,6].至今,我们始终坚持着积分球冷却气体原子的研究.随着半导体激光技术的发展,终于在2008年利用半导体激光器实现了积分球红移漫反射激光,从⁸⁷Rb背景气体中直接冷却原子,获得了原子数为 10^9 量级的原子,最低气体温度达到 $25\mu\text{K}$,并观察到超冷原子⁸⁷Rb的超精细结构光谱和光子反冲共振,如图2所示^[7,8].积分球红移漫反射激光冷却气体原子是一个非常有效的冷却气体原子的技术,实验设备简便,体积小,重量轻,不需要磁场,在小型星载原子钟的研制中起到了关键性作用^[8,9].

1979年,我提出了一个不同于多普勒冷却机制的新的冷却机制——利用交流施达克效应(光频移效应)激光冷却气体原子^[10].图3表示利用多能级原子的光频移效应和光抽运效应激光冷却气体原子的物理机制.当多能级原子在时间和空间上的非均匀光场中运动时,由于光强在空间的变化诱发原子的能级移动,原子会受到偶极力的作用,将自身的动能转化为势能.同时,经由光抽运效应将这部分能量以蓝移光子的形式自发地辐射出去,形成损耗原子动能的机制^[10].原子每散射一个光子,降低的速度为

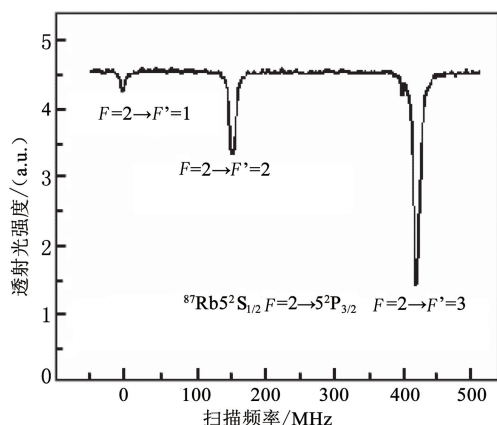


图2 积分球冷却⁸⁷Rb原子的超精细结构吸收谱(F=2至F'=3谱线的小峰是双光子共振峰)

$$\Delta V = \frac{h\nu_{l_1}^0}{mc} + \frac{h(\nu_{bc} - \nu_{l_2}^0)}{2mV} \left[\left(1 + \frac{E_0^2 |e \cdot r|_{bc}^2}{h^2 (\nu_{bc} - \nu_{l_2}^0)^2} \right)^{1/2} - 1 \right],$$

式中 h 为普朗克常数, m 为原子质量, c 为光速, E_0 为光场强度, $|e \cdot r|_{bc}$ 为偶极矩. 等式右边第一项是由于多普勒冷却机制的作用^[5], 第二项是由于光频移效应(交流施达克效应)冷却机制的作用. 因而原子在运动中不断地损耗动能, 降低了热运动速度, 原子气体被冷却. 利用光频移效应激光冷却气体原子的物理思想与国际上 1989 年提出的“Sisyphus(希腊神话故事)冷却机制的物理思想”相一致^[11-13].

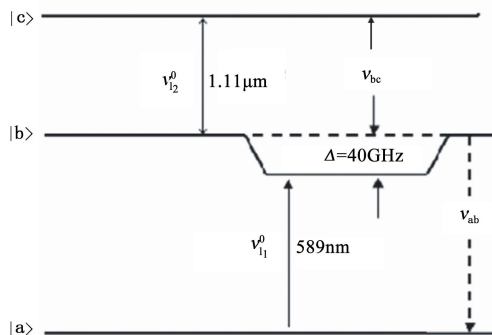


图3 利用交流施达克效应(光频移效应)激光冷却气体原子 (ν_{bc} 为能级跃迁频率, $\nu_{l_1}^0$ 和 $\nu_{l_2}^0$ 为相应能级的激光频率)

1979 年 8 月, 肖洛教授(诺贝尔奖获得者, “激光冷却气体原子”物理思想的提出者之一^[1])来华讲学时访问了我们实验室. 他赞同这种冷却机制, 在阅读了“利用交流施达克效应(光频移效应)激光冷却气体原子”的文稿后, 来信说: “这个思想是新的、合理的, 表达是直接的和清晰的, 我建议发表”, 并提出了几点修改意见^[14]. 收到回信后, 我倍受鼓舞. 但是 1980 年在中国召开的国际激光会议上海分会场上, 一位国外科学家并不认同这种冷却机制, 他用直流施达克效应做比喻: “在电容器中的一个原子, 加上电压, 原子能

级移动了, 如何能冷却原子?”. 实际上, 他提出的原子所处的状态不是我们提出的原子所处的状态. 因为, 原子在运动, 要从无电场区域进入到有电场区域, 由于电场在时间和空间上的非均匀性, 原子受到力的作用, 改变了原子的运动状态. 他还提问说“如果原子不动了, 那会如何?”一位瑞士的科学家大声地说: “不动了, 原子会动起来!”, 他支持我们提出的冷却机制. 一个新的学术观点总会受到质疑, 这是正常现象. 质疑使我们想得更清楚: “多能级原子(非两能级原子)在时间和空间上的非均匀光场中运动时, 由于光频移, 受到偶极力的作用, 经光抽运效应, 原子辐射出蓝移光子, 损耗自身动能而冷却.”^[10].

3 起始阶段的实验研究

对实验物理研究而言, 提出物理思想固然重要, 但更重要的是展示它实施的可行性和重要的应用价值. 实际上, 我们始终在寻求做实验的条件, 一方面到国外寻求做实验的可能性, 另一方面在力所能及的条件下建立自己的实验装置. 由于条件限制, 我们花了七、八年的时间才建立了自己的原子束实验装置, 开展了激光偏转原子束和一维激光冷却原子束的研究. 在这段时间里做出了一些受到国际同行关注的研究工作, 简单介绍如下:

3.1 多光束偏转原子束研究

1979 年, 中国科学院与日本学术振兴会互派访问学者, 中国科学院派我到日本东京大学作短期访问. 我的合作导师是著名的霜田光一教授, 他是日本量子电子学的创始人, 深受日本和国际科学界的敬重. 他热情地尽力帮助我寻找一个可进行激光冷却气体原子的实验室. 当年, 日本没有实验室开展“激光冷却气体原子”的研究. 霜田先生安排我在东京大学物理系作报告, 以此来寻求合作者. 我的报告引起了东京大学应用物理系清水富士夫教授的兴趣, 我们商定进行激光偏转原子束的实验. 清水先生找到了东京大学分子光谱实验室, 那里有先进的染料激光器和分子束装置. 我们进行了多光束激光偏转钠原子束实验, 图 4 是实验的方案图. 激光射入两个平面镜间, 形成多次反射的多光束. 调整平面镜的倾斜角度, 使入射光束的方向与原子束飞行的方向相互垂直, 并调谐激光频率, 使其与原子跃迁频率共振, 原子受到共振光压的作用. 同时, 反射光束与原子束呈倾斜的角度(见图 4), 由于多普勒效应, 反向光束与原子的共振频率失谐, 仅有入射光束的共振

光压作用于原子,从而使原子束偏转.当调制激光强度时,观察到偏转原子束的荧光在空间跳动,显示了光压力的作用.这个实验结果证明了辐射光压用于激光冷却气体原子的可行性和诱人的发展前景.

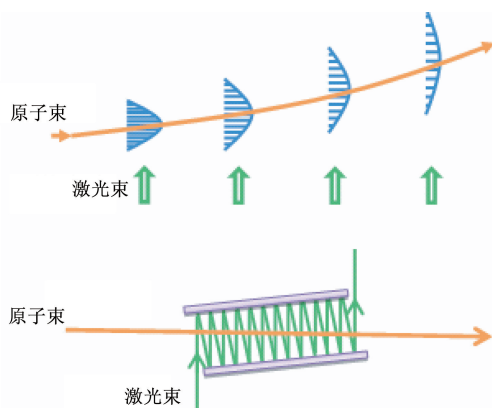


图4 多光束偏转原子束实验示意图

1984年,我们建成了自己的激光冷却气体原子的原子束真空装置.首先,重复了多光束偏转原子束实验.在我们建立的实验装置上,改进了传统原子束装置中探测束流强度的方法.通常原子束装置中采用移动的热丝探测器,即利用热电离原子的效应,测量离子流的强度,并用它表示原子的束流强度^[15].在我们的装置中,利用照相机和一维二极管阵列¹⁾,组成一维荧光探测器,记录原子束荧光的空间分布,如图5所示.我们将照相机镜头深入到真空腔体内,近距离地拍摄原子束荧光,获得了当时信噪比最佳的实验结果^[16].原子束偏转角度达到4毫弧度,信号噪声比大于50.我们还采用激光偏转原子束的方法,第一次利用光压测量了热原子束的速度分布,得到了实验和理论相一致的结果^[16].

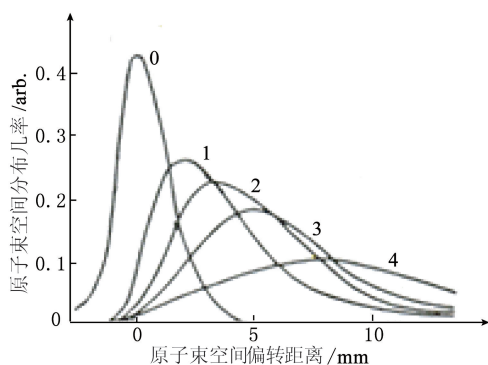


图5 激光偏转原子束的空间分布(图中0—4曲线对应的光压力逐渐增强,可以看出,随激光光强增大,偏转角也增大,导致空间分布距离变大)

在激光偏转原子束实验中,我们发现了一个十分有趣的现象:在探测窗口观察到像彩虹似的金黄色荧光条纹,如图6所示.它是由于多普勒效应产生

的钠原子的共振荧光.由于原子束有发散角,而激光束也有发散角,当发散的原子束与激光束在空间交汇时,满足共振条件的原子被激发,从而发射共振荧光.钠原子D₁线的激发态3P_{1/2}有两个高激发态分量,相隔190MHz.当探测激光频率调谐到两个激发态之间时,满足多普勒共振条件的共振荧光形成两个分离的圆弧(如图6所示),代表了原子的两个超精细分量.图中给出了荧光图像和理论计算的荧光谱线.测量两个圆弧的间距,可计算出钠原子激发态的超精细分裂为187MHz,据此我们提出了空间高分辨激光光谱技术^[17].

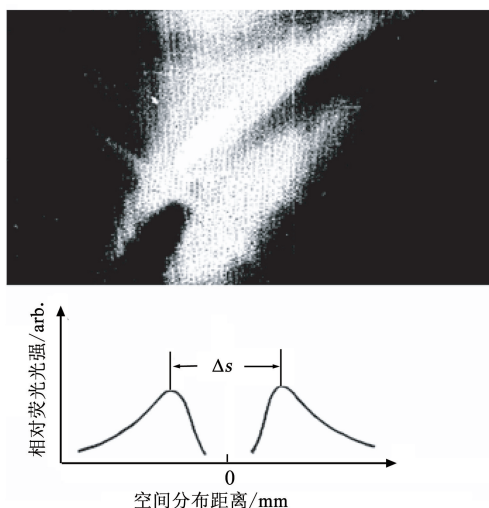


图6 钠原子空间荧光图像和理论计算的谱线线形(图中 Δs 表示激发态的超精细分裂能级间隔)

3.2 两能级原子共振荧光亚泊松光子统计规律的验证

1984年,为了寻求激光冷却气体原子的极限温度,需要测量原子在光场中的动量扩散系数 D ,它与自发辐射的光子数成正比.在实验过程中,我们第一次验证了二能级原子共振荧光的亚泊松光子统计规律^[18].量子理论预言:两能级原子的共振荧光在时间上具有反聚束效应,它是量子理论的特征,经典理论无以对应^[19].但是,量子理论的预言在当时并未得到实验证实.L. Mandel的理论分析表明,原子发射光子的反聚束效应导致发射光子统计分布为亚泊松分布,并给出了表征偏离泊松分布的 Q 参量^[20].R. J. Cook建议通过测量原子运动状态的变化,验证两能级原子共振荧光的统计分布,因为原子动量的分布记录了光子动量扩散的过程^[21].我们进行了

1) 当时世界上没有 CCD 照相机,也没有 CCD 照相机的概念.我们在展览上买到了美国新产品一维阵列二极管,并且第一次将阵列二极管和照相机组合,研制成功一维阵列二极管照相机,用于探测原子束荧光强度的实验.这是当时首次利用这个技术探测原子束的实验

两能级原子共振荧光光子统计分布的验证实验. 利用多光束偏转原子束的方法, 测量了表征偏离泊松统计分布的 Q 参量, 实验测量得到: $Q = -0.79 \pm 0.14$. 图 7 是原子动量扩散的实验结果. 实验证实了量子理论预言的正确性, 在 1985 年的国际激光光谱会议上做了邀请报告^[18].

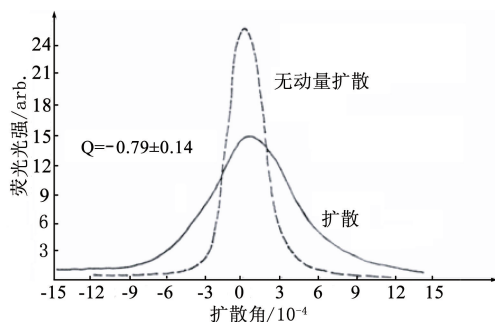


图 7 原子束动量扩散分布图

3.3 原子束的一维激光冷却

1987 年, 我们进行了钠原子束一维激光冷却实验. 观察到了低于多普勒冷却极限温度的现象, 这是国际上最早观察到这一现象的两个小组之一^[22,23]. 钠原子束垂直通过一维圆偏振激光驻波场, 沿驻波场轴线加了直流磁场, 用一维 CCD 照相机探测原子束荧光的空间分布. 当改变激光频率对原子共振的失谐量时, 观察到了激光对原子束横向一维冷却和加热现象(原子受力减速和加速), 如图 8 所示. 其中曲线 b 为原始原子束的一维速度分布. 曲线 a 为正失谐条件下, 由于光频移、光抽运和自发辐射等效产生迟后偶极力, 阻尼原子的运动速度. 原子束的一维横向冷却温度低于多普勒冷却极限, 等效温度达到 $66\mu\text{K}$. 在负失谐的条件下, 原子受力加速, 原子束分裂成两个峰, 如曲线 c 所示, 中心的小峰表示沿驻波场波谷运动的原子. 由于波谷处光强接近于零, 原子受到的辐射压力很小, 原子沿波谷直线运动称之为沟道原子^[22]. 1988 年, 我们曾写文章投稿到 *Phys. Rev. Lett.*, 文章未能发表, 审稿人认为实验结果与理论不符. 因为当时仅有两能级原子的冷却理论, 它不能解释低于多普勒冷却极限温度的实验结果. 后来, 我们的实验结果发表在 *Optics Communications* 上, 但理论解释并不正确^[22]. 我们曾想用“利用交流施达克效应激光冷却气体原子”来解释低于多普勒极限温度的结果, 但由于我们的信心不足, 而采用了国际上通用的两能级理论^[22,23]. 直到 1989 年, 国际上已有多个实验室观察到低于多普勒冷却极限温度的现象, 众多的实验事实使人们相信, 多普勒冷却极限已被打破, 必须用新的机制和新的

理论来解释这些令人难以置信的结果. 法国巴黎高等师范学校的科昂·唐努日 (Cohen-Tannoudji) 和美国斯坦福大学的朱棣文 (S. Chu) 分别解释了冷却机制, 即“Sisyphus”冷却机制^[11-13].

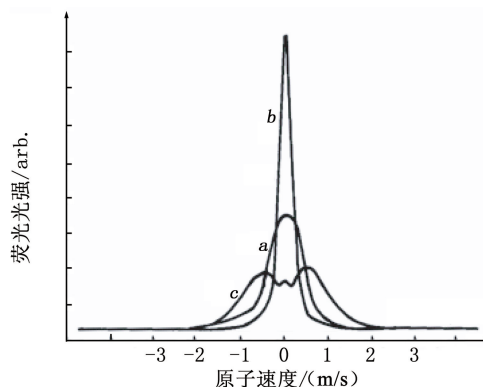


图 8 原子束一维激光冷却速度分布实验结果 (曲线 a 对应等效温度 $66\mu\text{K}$, 激光频率正失谐 50MHz , $P(\text{光强}/\text{饱和光强}) = 0.34$; 曲线 b 对应无激光原子束的一维速度分布, $P = 0$; 曲线 c 对应激光频率负失谐 25MHz , $P = 0.34$)

4 回顾与反思

在国际上激光冷却气体原子发展初期的 10 多年时间里, 我们的研究工作处于国际先进水平的行列, 但后续的工作跟不上国际发展的形势, 尽管我们做出了玻色-爱因斯坦凝聚 (BEC)、芯片 BEC、高频原子势阱和冷原子钟等工作, 但已落后于国际先进水平. 落后的原因很复杂, 有主观和客观的原因. 主观上除去个人的条件外, 最重要的是, 遇到巨大的客观困难时, 没有勇气去奋斗和抗争. 当年的客观科研环境十分不利于新学科的发展, 在很长时间内未能引起科技界的重视, 直到国际报道激光冷却气体达到凝聚体的温度 (是指冷原子的温度达到发生凝聚体相变的温度) 时才引起人们的关注. 但由于参与的研究人员很少, 经费投入十分有限, 设备落后而又无力更新改造, 以致于研究工作十分艰难. 一项有重要发展前景的研究领域, 在发展的初期可能不需要大量资金投入, 主要靠人的智慧和努力. 但是, 当在世界上该领域迅速发展起来的时候, 就需要众多优秀科学家的参与, 需要先进的技术支撑和大量资金的投入, 才能使这门学科研究蓬勃发展壮大. 从科研实践中我们深深感受到, 重要的科学研究没有足够经费的支持, 什么事也做不成. 因此, 科研工作的组织者起着关键性的作用, 他们要有广阔的科学知识, 前瞻的科学目光, 公正的心态和满腔的热情来支持、扶植新生的萌芽. 回首往事, 我们尽力完成了我们这一代人可能做的事, 但未完成我们应该能做的事.

在这段艰苦的时期里,从我们实验室锻炼出了一批优秀的青年科技工作者,他们走向了全国,走向了世界,成长为我国冷原子物理和原子钟研究的骨干力量.

当今,我国要建设成创新型国家,各项事业正走向高速发展,国家对科技事业提出了更高的新要求,需要更多的科技工作者为中国的科技事业献身.我们肩负着国家和人民的期望,任重而道远.为了争得中国在世界上的大国地位,我们必须奋力拼搏,锐意创新,坚定地克服任何困难,勇攀 21 世纪高科技的顶峰.祖国把希望寄托在新一代科学家身上,衷心希望我国优秀的科学家早日做出优异成绩,为中国人民争光.

参考文献

- [1] Haensch T, Schawlow A. *Opt. Commun.*, 1975, 13(1): 68
- [2] Wineland D, Dehmelt H. *Bull. Am. Phys. Soc.*, 1975, 20: 637
- [3] 王育竹. *中国激光*, 1979, 7: 1 [Wang Y Z. *Chinese Journal of Lasers*, 1979, 7: 1]
- [4] 王育竹. 全国光频标论证会. 四川成都, 1979. (见王义遒著《原子的激光冷却与陷阱》一书, 第 143 页)
- [5] Phillips W, Meicalf H. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, 48: 596
- [6] Chen H X, Cai W Q, Wang Y Z. *Chin. Phys. Lett.*, 1994, 11: 541; Wang Y Z, Liu L. *Australian Journal of Physics*, 1985, 48: 267
- [7] Cheng H D, Zhang W Z, Ma H Y *et al.* *Phys. Rev. A*, 2009, 79: 023407
- [8] Zhang W Z, Cheng H D, Xiao L *et al.* *Opt. Express*, 2009, 17: 2892; Zhang W Z, Cheng H D, Xiao L *et al.* *Phys. Rev. A*, 2009, 79: 053804
- [9] Perrin S S, Esnault F X *et al.* A new design of ECLD for compact atomic clocks. In: 21st Eur. Freq. Time Forum and the FCS, Paris, 2007. 1342
- [10] 王育竹. *科学通报*, 1980, 25(9): 432 [Wang Y Z. *Chinese Science Bulletin*, 1980, 25(9): 432]; 王育竹. *中国激光*, 1981, 8: 10 [Wang Y Z. *Chinese Journal of Lasers*, 1981, 8: 10]
- [11] Cohen-Tannoudji C N, Phillips W D. *Physics Today*, 1990, 10: 33
- [12] Dalibard J *et al.* *Proc. Atomic physics 11*. Singapore: World Scientific, 1989. 199
- [13] Chu S *et al.* *Proc. Atomic physics 11*. Singapore: World Scientific, 1989. 636
- [14] Schawlow A. 私人通信. 1980 年 3 月
- [15] Towns C H, Schawlow A L. *Microwave Spectroscopy*. McGRAW HILL Publishing Company LTD, 1955. 384
- [16] 王育竹, 周汝枋等. *中国科学*, 1984, A5: 467 [Wang Y Z, Zhou R F *et al.* *Scientia Sinica*, 1984, A5: 467]; 王育竹, 程与旦, 周善钰等. *中国激光*, 1985, 12: 658; [Wang Y Z, Cheng Y D, Zhou S Y *et al.* *Chinese Journal of Lasers*, 1985, 12: 658]
- [17] Wang Y Z, Zhou R F *et al.* *Opt. Lett.*, 1984, 9: 276
- [18] Wang Y Z *et al.* *Laser Spectroscopy VII*. Springer-Verlag, 1985. 283
- [19] Carmichael H J *et al.* *J. Phys. B*, 1976, B9: 1199; Kinble H J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1977, 39: 691
- [20] Mandel L. *Opt. Lett.*, 1979, 4: 405
- [21] Cook R J. *Phys. Rev.*, 1980, 22: 1078
- [22] Wang Y Z, Cai W Q, Chen Y D *et al.* Observation of slow atoms in a standing wave. In: IQEC 88—Asia branch meeting, Topical meeting on Material and Laser Spectroscopy, Shanghai, China, 1988. 351; Wang Y Z, Chen Y D, Cai W Q *et al.* *Optics Communication*, 1989, 70: 462
- [23] Lett P D, Watts R N, Westbrook C I *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1988, 61(1): 169