



物质的新状态——玻色 - 爱因斯坦凝聚*

——2001 年诺贝尔物理奖介绍

陈徐宗^{1,3} 周小计^{1,3} 陈 帅^{2,3} 王义遒^{1,3}

(1 北京大学电子学系 北京 100871)

(2 北京大学物理系 北京 100871)

(3 量子信息与测量教育部重点实验室 北京 100871)

摘 要 美国国家标准和技术研究所的 Eric A. Cornell 教授、美国麻省理工学院的 Wolfgang Ketterle 教授与美国科罗拉多大学的 Carl E. Wieman 教授由于“在稀薄的碱金属气体中成功地获得玻色 - 爱因斯坦凝聚,并且对凝聚体特性进行的早期基础性研究”方面的贡献,而荣获 2001 年诺贝尔物理奖,文章介绍了该研究的背景、三位诺贝尔奖得主贡献及其意义。

关键词 玻色 - 爱因斯坦凝聚, 诺贝尔物理学奖

BOSE-EINSTEIN CONDENSATE, A NEW STATE OF MATTER ——AN INTRODUCTION TO THE 2001 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

CHEN Xu-Zong^{1,3} ZHOU Xiao-Ji^{1,3} CHEN Shuai^{2,3} WANG Yi-Qiu^{1,3}

(1 Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

(2 Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

(3 Key Laboratory of Quantum Information and Measurement, Ministry of Education, Beijing 100871, China)

Abstract The Nobel Prize in Physics 2001 was awarded to Eric. A. Cornell, Wolfgang Ketterle, and Carl. E. Wieman for “the achievement of Bose-Einstein condensation in dilute gases of alkali atoms, and for early fundamental studies of the properties of the condensate”. We give a brief introduction to the reearch background, the contribution of the laureates and the significance of Bose-Einstein condensation.

Key words Bose-Einstein condensates, Nobel Prize in Physics

2001 年 10 月 9 日,瑞典皇家科学院宣布^[1], 2001 年度诺贝尔物理奖授予美国国家标准技术研究所与科罗拉多大学的联合天体物理研究所(JILA) 39 岁的教授科耐尔(Eric A. Cornell)和 50 岁的教授维曼(Carl E. Wieman)以及美国麻省理工学院(MIT) 43 岁的德裔教授凯特利(Wolfgang Ketterle),以表彰他们在玻色 - 爱因斯坦凝聚实验研究中的杰出贡献。什么是玻色 - 爱因斯坦凝聚?三位科学家在该研究中做出了什么贡献?研究玻色 - 爱因斯坦凝聚有何意义?本文试图就此作一简要的阐述,有关其详细内容可参阅本文的参考文献。

1 玻色 - 爱因斯坦凝聚——新的物质状态

早在 1924 年,年轻的印度科学家玻色撰写了一篇论文,用完全不同于经典电动力学的统计方法,推导出普朗克的黑体辐射公式。他将论文寄给了爱因

斯坦,爱因斯坦马上认识到该文的重要性,并将其译成德文发表。紧接着,爱因斯坦将玻色的方法推广到单原子理想气体,并预言这些原子当它们之间的距离足够近,速度足够慢时,将发生相变,变成一种新的物质状态^[2],后人称之为玻色 - 爱因斯坦凝聚(Bose - Einstein condensates, BEC)。在处于这种状态的物质中,所有粒子都处于能量的最低态,并且有相同的物理特征。这种物质将粒子的量子特性通过宏观的方式表现出来。就原子而言,只要其总的自旋量子数为整数,则为玻色子。对于气体状态的原子,在常温下通常表现出经典粒子的特点(即原子就如一大群台球,互相碰撞,并表现出各自不同的运动特

* 教育部自然科学重大基金(批准号 00 - 09)资助项目;国家自然科学基金(批准号:10074003)资助项目

2001 - 11 - 08 收到初稿, 2001 - 12 - 12 修回

征(每个原子都需要用一个波函数描述);当温度降到足够低时,本来各自独立的原子会变成一群‘集体主义’的原子(它们只需用一个波函数来描述);‘凝聚’在一个相同的量子状态.这就是当时爱因斯坦预言的气体玻色原子形成玻色-爱因斯坦凝聚体的状况.爱因斯坦的论文发表后引起了广大物理学工作者的兴趣,大家都期望在真实的原子气体中获得 BEC.然而,由于该实验的难度很大,直到 1995 年,经过整整 70 多年的努力,JILA 的 Eric. A. Cornell, Carl. E. Wieman 小组和 MIT 的 Wolfgang Ketterle 小组才在实验中真正实现了 BEC^[3,4].在爱因斯坦预言 BEC 的同时,德国科学家德布罗意在 1924 年指出,任何一种粒子都具有波粒二象性,如果粒子的动量为 p ,则其德布罗意波长 $\lambda = h/p$,这里 h 为普朗克常数.这公式表明,当粒子的速度变得很慢时,其德布罗意波长就会显著增大.对于原子来讲,当其温度足够低时,它的德布罗意波长 λ 可达微米量级,这时在同一气体中的原子由于其平均距离很短,每个原子都可以“感觉”到其他原子的德布罗意波,并达到统一的“步调”.这种情况就如同激光束中的光子一样,各自处于相干的状态,因此这种状态的原子也称为“相干物质”.

2 实现玻色-爱因斯坦凝聚的历程

在 1924 年提出 BEC 的思想以后,许多科学家纷纷在实际物质中探索 BEC 的迹象,第一个引起大家注意的便是氦⁴He,它在温度为 2.17K 以下时,具有超流现象,该现象首先被 H. Kamerlingh Onnes 发现,并由此在 1913 年获诺贝尔奖物理奖.1938 年, F. London 指出,超流可能具有氦原子的 BEC 特性.但是很长一段时间,人们都无法将超流的物理特性和 BEC 直接联系起来,直到 1950 年, O. Penrose 和 L. Onsager 在研究超流的长程作用时才发现它们具有玻色系统的关联性.由此,他们推断在超流氦中,只有 8% 的原子具有 BEC 特性.其原因是超流氦中存在着很强的相互作用,这使它的特性大大地和由无相互作用的理想气体形成的玻色-爱因斯坦凝聚体特性不一致.尽管如此,超流在温度 2.17K 时发生相变的现象在一定意义上和爱因斯坦提出的凝聚有一定的联系.

和低温液氦中的阻尼力消失形成超流相似,某些金属在低温下会失去电阻而形成超导,这一现象首先由 H. Kamerlingh Onnes 于 1911 发现,但是解释这一现象的微观理论在 1952 年才由 J. Bardeen,

L. N. Cooper 和 J. R. Schrieffer 给出.该理论指出,在低温条件下,金属中自旋相反的自由电子会形成很强的关联——库珀电子对,这样的电子对对周围环境不“敏感”,因此,电阻就消失了.尽管单个电子是“费米子”,它们遵循“费米-狄拉克”统计,但它们形成的电子对却和“玻色子”相似,于是超导的相变和 BEC 相似,但是,由于超导系统属于强关联系统,和无相互作用的玻色凝聚体系相差较远.

1960 年激光的发明为囚禁和冷却气体原子提供了一种新的方法.1968 年,前苏联科学家 V. S. Letokhov 提出利用激光场来囚禁中性原子的建议^[5].1970 年,美国 Bell 实验室的科学家 A. Ashkin 提出利用激光的压力偏转原子束.紧接着,1975 年美国斯坦福大学的 T. W. Haensch 和 A. L. Schawlow^[6]提出利用激光来冷却原子.他们的基本思想是让运动原子吸收其迎面射来的激光束中的光子,由于原子运动产生的多普勒效应,使其吸收比原子跃迁中心频率低的光子,随后原子又发射出和其中中心跃迁频率相同的光子,这样运动原子吸收频率偏低的光子,放出频率偏高的光子.这一过程遵循能量守恒,原子必须减少动能以补充放出光子的能量.由于吸收和放出光子的过程可以在 10^{-8} s 内完成,这样过程不断重复,原子可以在很短的时间内通过激光冷却将自己的动能降为零.因此,激光冷却是一种冷却效率极高的方法.前苏联科学院光谱学研究所的 V. E. Balykin 与 V. S. Letokhov 和美国国家标准和技术研究所的 W. D. Phillips 分别于 1980 年在实验上冷却了钠原子束^[7].紧接着, W. D. Phillips 和当时在美国 Bell 实验室 Ashkin 小组的朱棣文与法国巴黎高等师范学院的 Cohen - Tannoudji 发展了一系列激光冷却的新方法,使激光冷却成为了冷却气体原子的一种最有效的方法,为此,他们三个分别获得了 1997 年的诺贝尔物理奖.其中特别值得一提的是,1986 年,法国巴黎高等师范学院 Cohen - Tannoudji 教授的学生 J. Dalibard 提出了一种冷却和囚禁原子的新方案^[8]: 磁光阱(MOT),其基本思想是用一对反亥姆零兹线圈和六束对射的圆偏振光束,使得在磁场中央的原子主要接受向中心辐射的光子,从而形成一个阱深较深的势阱.这样中性原子可以被较长时间地束缚在其中,并被激光不断地冷却至 mK 量级.这种方法由麻省理工学院的 D. E. Pritchard 和朱棣文合作在实验上首先实现,这样就开始了在气室中直接冷却和囚禁中性原子的历史.这是后来最终实现 BEC 的基础.

在人们将注意力转向利用碱金属原子实现 BEC 之前,人们首先选择的原子是氢原子.在 1924 年提出 BEC 理论之后,科学家们就对利用稀薄气体中的原子形成 BEC 进行了分析.分析发现要在稀薄气体中直接产生 BEC 并不容易,因为要实现 BEC,就必须冷却气体原子,并使它们的动量足够小,而其德布罗意波长足够长,以至各自的德布罗意波发生相互重叠.这样,要求原子之间的距离也要足够近.因此,获得超低温($\sim 100\text{nK}$,使德布罗意波足够长)和高密度($\sim 10^{12}/\text{cm}^3$,使原子间距离足够近)是成功的必要条件.通常,将在一定密度条件下开始形成 BEC 的温度称为临界温度(T_c).然而,对许多原子来说,在如此低的温度时,原子很容易和相邻原子结合形成气体分子或形成液体.而 BEC 要求原子在这种高密度情况下仍然保持原子的气体状态.1973 年, L. H. Nosanow 和 W. C. Stwalley^[9]提出自旋极化的氢原子在极低的温度下仍可保持其原子气体状态,因为这时原子之间有微弱的排斥力存在,这将抵抗范德瓦尔斯力而不形成氢分子气体.这样,氢原子气体就相当于一种弱相互作用气体,可以形成 BEC,并具有明显的理想气体 BEC 的特征.20 世纪 80 年代初,美国麻省理工学院的 D. Kleppner 小组和荷兰阿姆斯特丹大学的 J. T. M. Walraven 小组开始了利用氢原子实现 BEC 的探索^[10].为了获得低温的氢原子,他们用一种称为 Ioffe 阱的磁阱将氢原子囚禁起来,以后利用射频场从高频至低频扫频,将动能高的氢原子从磁阱中剔除出去,留下动能低的氢原子,使磁阱内的氢原子气体温度降低.这种方法的原理就如一杯热水,其中能量高的水分子通过蒸发而跑出水面,留下能量低的水分子在杯中,使热水的温度降低一样,因此称为蒸发冷却.然而这种方法在 1995 年之前并没有使氢气体温度降到临界温度(T_c)之下而获得 BEC,但这种方法却用于其他碱金属原子冷却而获得了成功.

在实现氢原子气体 BEC 实验受挫后,科学家们开始将注意力转移到利用碱金属原子实现 BEC.由于碱金属原子外层有一个价电子,只要其核的总自旋为奇数,则总的原子体系为玻色子,其中铷原子 ^{87}Rb 和钠原子 ^{23}Na 都是满足上述要求的碱金属原子.

90 年代初,美国科罗拉多大学和美国国家标准和技术研究所(NIST)的联合天体物理实验室的 C. E. Wieman 开始了利用 ^{87}Rb 实现 BEC 的研究项目.他的基本思想是首先利用激光冷却磁光阱(MOT)中的铷原子气体,然后,将它们转换至静磁阱中,并用

蒸发冷却的方法继续将铷原子气体冷却直至获得 BEC.为了达到上述目标,他招聘了 1990 年于美国 MIT 刚获得博士学位的 Eric A. Cornell 作为博士后,主要负责该项目,另外有两名研究人员作为助手.该小组在实验中首先利用 MOT 将 ^{87}Rb 气体冷却到 $40\mu\text{K}$ 左右,然后把这些原子通过光抽运方法制备在相同的自旋态上.接着去掉激光,利用原 MOT 中的反亥姆霍兹磁阱将冷却的铷原子气体囚禁,这时铷原子就在磁阱中作振荡运动.该磁阱的中心处磁场为零,当原子运动至此,由于能级简并的原因,其中部分原子就会从原来受磁场束缚的自旋态转换到不受磁场束缚的自旋态上,时间稍长,原子就会从磁阱中心的“漏洞”中消失.这样,就不可能形成高密度的气体.为了防止原子从磁场中心漏出, Cornell 在原磁阱中加了一个横向旋转的磁场,这样,就把原有的磁场零点去掉了,这种方法称为“轨道时间平均势法”(time-orbiting potential, TOP).在此基础上,他们在磁阱中加上扫频微波,通过“蒸发冷却”将 TOP 磁阱中的铷原子冷却至 100nK 左右,这时就开始形成 BEC.图 1 是 JILA 小组在 1995 年 6 月获得的铷原子 BEC,在 170nK 时开始形成 BEC,进一步冷却至 20nK ,可以得到很“纯”的 BEC,其中的原子数为 2000 左右.在 JILA 小组于 1990 年开始进行铷原子 BEC 项目研究的同时,美国 MIT 的 Pritchard 小组,开始了用 ^{23}Na 形成 BEC 的尝试.这时从德国马克斯-普朗克量子光学研究所获博士学位的 Ketterle 加入其列,成为 Pritchard 教授的博士后,并在 1993 年后独立地领导一个小组进行 BEC 实验.他也和 JILA 小组一样,用了从 MOT 到蒸发冷却的程序,在磁阱蒸发冷却阶段,他巧妙地将一束强激光束射入磁阱的中央,利用蓝移激光的斥力将原子磁阱中的“漏洞”堵住了.这样,他领导的小组在 JILA 小组获得 BEC 三个月以后,也获得了钠原子的 BEC,如图 2 所示,其中 BEC 的原子数高于 JILA 小组 BEC 中原子数两个数量级,因此,有着更高的观察信噪比.

在 JILA 和 MIT 小组进行 BEC 探索的同时,美国 Rice 大学的 Hulet 教授小组也在探索利用锂原子(^3Li)实现 BEC 的可能性,并在 1995 年发表了初步结果.和铷、钠不同,锂原子之间的势是吸引势,它要用负“散射长度”来描述.而对于铷和钠,其“散射长度”为正,这表示它们间的相互作用是排斥,当它们离得很近时,也不会结合成分子.但对于锂原子就不同,由于其相互作用势为吸引势,当它们离得很近时,有可能在吸引势作用下形成分子.理论上预言,当锂原子数在小于 1400 时,才能形成 BEC,大于该数目时, BEC 就会“崩塌”.1995 年的锂原子 BEC 由

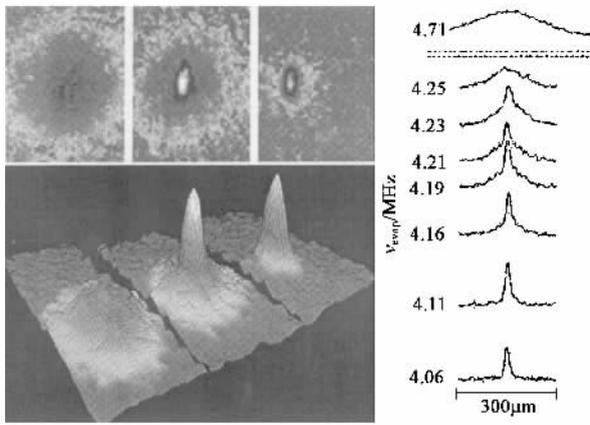


图1 JILA小组观测到的铷原子 BEC 像

(左上角为利用吸收成像法拍摄的三幅照片,第一幅表示在 BEC 形成之前,原子为均匀球对称分布;第二幅为 BEC 形成以后的情形,中心突出部分为 BEC,由于磁阱的不对称性,BEC 形状呈压扁状,其边缘部分为热原子分布,成对称分布;第三幅为接近纯 BEC 的情况,边缘几乎没有热原子。下图是对应上面三部分的原子空间分布的三维像, x, y 轴对应空间分布, z 轴对应原子数密度。右边是原子云的截面图。在蒸发冷却过程中,射频场频率低于 4.25MHz 时开始出现 BEC,在射频场频率低于 4.06MHz 时几乎为纯 BEC)

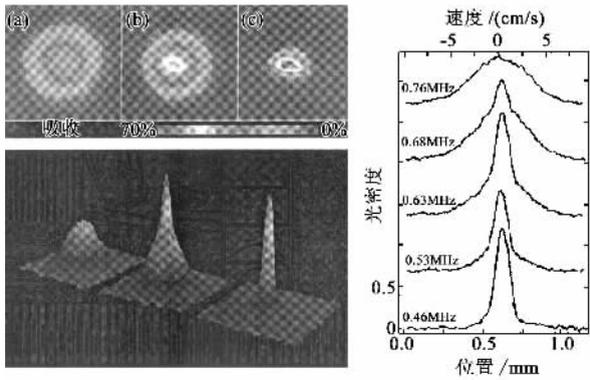


图2 MIT小组观测到的钠原子 BEC 像

(左上角为利用吸收成像法拍摄的三幅照片,第一幅表示在 BEC 形成之前,原子为均匀球对称分布;第二幅为 BEC 形成以后的情形,中心突出部分为 BEC,由于磁阱的不对称性,BEC 形状呈压扁状,其边缘部分为热原子分布,成对称分布;第三幅为接近纯 BEC 的情况,边缘几乎没有热原子。下图是对应上面三部分的原子空间分布的三维像, x, y 轴对应空间分布, z 轴对应原子数密度。由于这里的原子密度高于 JILA 小组两个数量级,图上可见其信噪比很高。右边是原子云的截面图。在蒸发冷却过程中,射频场频率低于 0.76MHz 时开始出现 BEC,在射频场频率低于 0.46MHz 时几乎为纯 BEC)

于上述原因存在着很大的争议,直至 1997 年,Hulet 小组才在实验上获得了令人信服的锂原子 BEC,数量为 1000 左右,和理论一致^[9]。

尽管氢原子没有首先实现 BEC,但 MIT 的 Klep-

pner 小组并没有放弃,在采取改进蒸发冷却技术和增加氢原子数($\sim 10^9$)等措施后,他们于 1998 年终于成功地获得了氢原子 BEC^[10]。在 1995 年后,法国巴黎高等师范学院的 Salamon, Cohen - Tannoudji 小组和奥塞光学研究所的 Aspect 小组进行了氦原子 BEC 的探索,并于 2001 年 2 月份分别获得了亚稳态氦原子 BEC^[11,12],2001 年 10 月,利用“感应冷却”(sympathetic cooling)的方法,又实现了钾原子气体的 BEC^[13]。

在 1995 年成功地在实验上获得 BEC 后,引起了许多理论工作者的关注,对于稀薄气体纯的 BEC,可以用已有的理论来很好地描述它,这就是早年由 Ginsburg 和朗道在分析超导时导出后来被 Gross - Pitaevski 推广的方程,该方程被称为 GP 方程。利用该方程可以分析 BEC 的特性并预言 BEC 的许多新特征,这又促进了 BEC 实验研究的进一步发展和深化。但是,由于许多有关 BEC 新特性的实验不断涌现,完整的 BEC 理论还在进一步探索中。

玻色 - 爱因斯坦凝聚体是一种宏观的量子状态物质,在这种物质中,空间各部分和其他部分都有关联,就如同激光束中的各部分光子都有关联一样,这种关联是相干性的体现。为了证实这种新物质的确具有这种特性,MIT 的 Ketterle 小组将玻色凝聚体分成两团,并让它们相互重叠,这时可以明显地观察到它的干涉条纹^[14],如图 3 所示。这充分显示了玻色 - 爱因斯坦凝聚体是一种相干物质,一种新的宏观量子状态的物质。

由于玻色 - 爱因斯坦凝聚体是一种长程相干的物质,整个的凝聚体可以用一个单粒子波函数来描述。理论表明,这种单粒子波函数在处于旋转状态时,具有量子化的现象,这种现象称作量子涡旋——Vortex,这一现象首先由 JILA 的 Cornell 和 Wieman 小组在铷 BEC 中证实^[15]。另外,如何把玻色 - 爱因斯坦凝聚体从磁阱中相干地输出,这是利用 BEC 的重要途径和条件。MIT 的 Ketterle 小组于 1997 年首次将 BEC 象水滴般地从磁阱中输出,形成了脉冲状的凝聚体,就如激光的脉冲光束一样,故称其为“原子激光”(atom laser)^[16],如图 3 所示。

在实现玻色 - 爱因斯坦凝聚的条件中,原子间的散射长度起着决定性的作用,但理论表明,这种散射长度和作用于原子的磁场有关,在一定的磁场条件下,散射长度可以改变符号,这种现象称为 Feshbach 共振,Ketterle 小组在 BEC 中首先研究了这一现象^[17]。

综上所述,在 BEC 的研究过程中,JILA 小组和 MIT 小组的确起着领导作用,为此,这两个小组的三

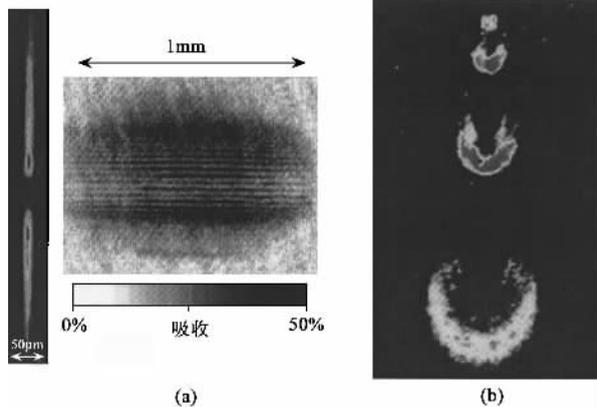


图 3

(a) 两团 BEC 在下落过程中的干涉条纹；
(b) 从磁阱中输出的 BEC 小滴，称为“原子激光”

位主要科学家获得 2001 年的诺贝尔物理学奖是当之无愧的。

3 玻色 - 爱因斯坦凝聚研究的意义

BEC 的实现开辟了一个新的研究领域，到目前为止，已有 20 多个研究小组成功地获得了 BEC，还有更多的小组正在开展这方面的实验研究，在中国，已有四个小组（中国科学院上海光学精密机械研究所、北京大学、山西大学、中国科学院武汉物理与数学研究所）正在进行 BEC 实验的准备，更多的小组是在对 BEC 的理论进行探索。从 1995 年在实验上实现 BEC 以来，BEC 的许多特性引起了大家的兴趣，并取得了一批引人注目的成果，如 BEC 的相干放大、四波混频、光速在 BEC 中急剧减慢、利用光子晶体模拟固体效应在 BEC 中实现了压缩态、BEC 中约瑟夫森效应的宏观量子特性、分子凝聚体的研究等。BEC 作为一种新的物质状态，研究其自身的物理性质以及所包含的物理过程，本身就具有重大的科学意义。同时，还可以通过研究这种系统去认识、检验自然界的一些规律，探索新的规律。

研究 BEC 除了对基础研究有促进作用外，对应用研究也有促进作用。由于 BEC 实验运用了现代技术的最新成果，它涉及超高真空技术（ $\sim 10^{-9}$ Pa）、激光稳频技术、激光频率精密控制技术、射频控制技术、磁阱技术及多路信号时序控制技术等。BEC 的实现既对上述技术提出了要求，本身也对上述技术的发展作出了贡献，如外腔半导体激光和饱和吸收光谱稳频技术，BEC 的早期研究推动了该技术的发展^[18]。不仅如此，在 BEC 基础上形成的原子激光，可能使现有的原子钟的精度得到极大提高，推动原子

显微镜、原子全息术的发展，特别是，它能以极高的精度将原子沉积在固体表面上，在原子水平上操控物质，导致纳米技术新的发展。最近，在微磁阱中实现 BEC 就充分证明了原子集成电路实现的可能性^[19]。

BEC 研究的成果还将推动相关领域的发展，如天体物理中的白矮星的模拟研究、高精密度测量、量子信息处理以及未来的原子刻蚀技术等。21 世纪对 BEC 的研究还是方兴未艾。

参 考 文 献

- [1] Krutmeijer E. Advanced Information on the Nobel Prize in Physics 2001, www.Nobel.Se/Physics/Laureates/2001/Press.html
- [2] Bose S N, Z. Physik, 1924, 26 :6178; Einstein A, Sitzungsber, Kgl. Preuss, Akad. Wiss, 1924, 261 ;1925, 3
- [3] Anderson M H *et al.* Science, 1995, 269 :198
- [4] Davis K B *et al.* Phys. Rev. Lett., 1995, 75 :3969
- [5] Letokhov V S, Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz., 1968, 7 :348
- [6] Haensch T, Schawlow A. Opt. Comm., 1975, 13 :68
- [7] Balykin B N, Letokhov V S, Mushin V I. JETP Lett., 1979, 29 :560; Phillips W D, Metcalf H. Phys. Rev. Lett., 1982, 48 :596
- [8] Dalibard J, Private communication to D. Pritchard
- [9] Bradley C C, Sackett C A, Hulet R G. Phys. Rev. Lett., 1997, 78 :985
- [10] Fried D G, Killian T C, Willmann L *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81 :3811
- [11] Roberts A *et al.* Science Express, 2001, 10 :1126
- [12] Pereira D S F, Leonard J, Wang J. Phys. Rev. Lett., 2001, 86 :3459
- [13] Modugno G *et al.* Science, 2001, 10 :1126
- [14] Andrews M R, Townsend C G, Miesner H-J. Science, 1997, 275 :637
- [15] Matthews M R *et al.* Phys. Rev. Lett., 1999, 83 :2498
- [16] Mewes M-O *et al.* Phys. Rev. Lett., 1997, 78 :582
- [17] Inouye S, Andrews M R, Steeger J. Nature, 1998, 392 :151
- [18] Wieman C E, Hollberg L. Rev. Sci. Instrum., 1991, 61 :1
- [19] Haehsel W *et al.* Nature, 2001, 413 :498

作者简介



陈徐宗，北京大学电子学系教授，1958 年生，江苏苏州市人，1993 年于中国科学院上海光学精密机械研究所获理学博士学位，1993—1995 年北京

大学博士后，1995 年任北京大学电子学系副教授，2000 年任教授。1996—1997 年任日本工业技术研究院特别研究员。长期从事激光冷却、囚禁原子及原子分子光谱的研究，先后在钠原子冷却、铯原子磁光阱、原子喷泉、铯原子偏振光谱、碘分子超精细光谱、半导体激光频标等方面做了大量工作，发表论文 60 多篇。目前正从事玻色 - 爱因斯坦凝聚、电磁感应透明、原子分子超精细光谱、半导体激光技术与频标等研究。