

## 新世纪的第一只燕子

——2001 年度诺贝尔物理学奖述评\*

魏晓云 张彤 张端明

(华中科技大学 武汉 430074)

**摘要** 文章介绍了玻色-爱因斯坦凝聚的原理,着重讨论了 2001 年诺贝尔物理学奖得主科耐尔(E. A. Cornell)、维曼(C. E. Wieman)和凯特利(W. Ketterle)在世界上首次产生铷原子和钠原子的玻色-爱因斯坦凝聚的贡献,以及最近他们在玻色-爱因斯坦凝聚物理的研究和实现原子激射的诸多进展.并对玻色-爱因斯坦凝聚物理的发展与技术上的应用进行初步展望.

**关键词** 玻色-爱因斯坦凝聚 宏观量子现象 原子激光冷却与捕获 磁光阱(MOT)

THE FIRST NOBEL PRIZE OF THE CENTURY  
——COMMENT ON BOSE-EINSTEIN CONDENSATION

WEI Xiao-Yun ZHANG Tong ZHANG Duan-Ming

(Huazhong University of Science &amp; Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** The principle of Bose-Einstein Condensation (BEC) is outlined. The great contribution of E. A. Cornell, C. E. Wieman and W. Ketterle who shared the 2001 Nobel Prize in Physics in creating the world's first Bose-Einstein Condensate is described. New progress in their studies of BEC physics and atom lasers is reviewed, as well as further prospects of for the applications of BEC.

**Key words** Bose-Einstein Condensation, macroscopic quantum phenomena, laser trapping and cooling of atoms, magneto-optical trap

## 1 迎接新世纪的物理学春天的第一只燕子

2001 年 10 月 9 日,瑞典斯德哥尔摩,瑞典皇家科学院发表公报,庄严宣告,将 2001 年诺贝尔物理学奖授予三位科学家,以表彰他们根据玻色-爱因斯坦理论<sup>[1,2]</sup>,发现了一种新的物质形态——“碳金属原子稀薄气体的玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)”。

公报宣称,长期以来,让物质处于可控制状态,一直是科学家面临的挑战. BEC 正是爱因斯坦在 1924 年就预言过,可以控制的梦幻般的奇怪物质。

公报指出,1995 年,美国物理学家科耐尔(E. A. Cornell)和维曼(C. E. Wieman)在只比绝对零度(即 -273.16°C)仅高于 1700 亿分之一的超低温下(注意,这在技术上刷新了当时的世界低温记录),成功地使

约 2000 个铷原子形成“玻色-爱因斯坦凝聚”<sup>[3,4]</sup>。

与此同时,德国人凯特利(W. Ketterle)领导的麻省理工学院研究组用钠原子( $^{23}\text{Na}$ )进行了同样成功的实验,其论文仅仅只比维曼、科耐尔的迟发表 4 个月<sup>[5]</sup>。他们制造出来的“凝聚物”包含了更多的原子,其数量级高于科耐尔与维曼的 2 个数量级以上,因而对研究“玻色-爱因斯坦理论”更有价值。

公报还颇有诗意地宣称,分享今年诺贝尔物理学奖的三位科学家的成功发现,宛如找到“让原子齐声歌唱”的途径.他们发现的新的物质形态——BEC 是可以控制的,必将给精密测量和纳米科技等领域带来“革命性的变革”。

事实上,有识之士早就注意到,在量子光学、原

\* 2001-12-05 收到初稿,2002-04-28 修回

子与分子物理学以及超低温物理等交叉领域,从 20 世纪 90 年代以来,正在发生戏剧性的变化.试看

1989 年诺贝尔物理学奖由美国科学家迪迈尔特(H. Dehmelt)、保尔(W. Paul)和拉姆齐(N. F. Ramsey)获得;

1997 年诺贝尔物理学奖由美籍华人朱棣文、法国人科昂·塔努西(C. Cochen-Tonnoudji)和美国人菲利普斯(W. D. Philips)获得;

1998 年诺贝尔物理学奖由美国人拉夫林(R. E. Laughlin)、崔琦(Daniel. C. Tsui,美籍华人)和施默特(R. E. StÖmer)获得等等.

以上获奖的工作,均在上述交叉领域,尤其是朱棣文等的工作,发现利用激光冷却和捕捉、操纵原子的方法,更是实现 BEC 的直接前驱工作.由于前所未有的超低温的获得,人们按二连三地发现许多新现象,简直如“山阴道上,应接不暇”.仅就缘起高密度介质的所谓电磁感应透明现象,举其萃萃大端者就有:

1999 年初, L. Hau 及其合作者<sup>[6]</sup>在 450nK 极低的温度下,将通过钠原子的 BEC 介质的光脉冲的速度减慢到 17m/s,比真空中的光速减慢近  $2 \times 10^7$  倍.

2001 年,终于传来 L. Hau 小组已成功实现将光的速度减慢到零,并且使光在介质中停留了几百微秒,而后重新放出来的消息<sup>[7]</sup>,如此等等.

所有这一切是否意味着,物理学是否又像上个世纪之交一样,面临着一场更伟大、更壮丽的伟大发现、大革命呢?我们不会忘记,伦琴发现 X 射线,贝克勒尔、居里夫妇发现放射性,汤姆孙发现电子,等等,都是发生在 19 世纪 20 世纪之交,它们预示着 20 世纪物理学伟大革命来临,为相对论与量子论的诞生奠定基础.笔者在 1997 年乐观地预言,朱棣文等的工作就是 21 世纪物理学的新革命的突破口<sup>[9]</sup>. 1999 年更指出,20 世纪末出现的 BEC 及原子激光,“给本世纪物理学添上浓重而辉煌的一页”.它们像“洪钟大吕的雷鸣,在呼唤着 21 世纪物理学更辉煌的篇章”<sup>[10]</sup>.

看来,有关交叉领域捷报频传,倍受科学界青睐,绝非偶然.或许 2001 年的诺贝尔物理学奖,就像春天里的第一只燕子,随着而来的就是物理学的一个百花盛开的无边春色吧.

## 2 何谓玻色 - 爱因斯坦凝聚(BEC)

BEC 是爱因斯坦早在 1924—1925 年间预言的

新的物质形态<sup>[2]</sup>.原来,1924 年,印度物理学家玻色(Satyendra Nath Bose)任教于达卡大学.他寄给爱因斯坦一篇论文.论文藉助纯粹统计物理的方法,完全不涉及经典电动力学,就推导出光子的普朗克分布规律.爱因斯坦立刻领悟到,这是一篇很有份量的工作,迅速将此文推荐到德国 Zeitschrift für physik 上发表<sup>[1]</sup>.爱因斯坦在自己的工作<sup>[2]</sup>中,将玻色的方法推广应用于单原子理想气体.今天我们都知道,以  $h$  为单元,所有自旋为整数的微观粒子,称为玻色子,它们都遵循玻色 - 爱因斯坦统计,其特征是表现完全对称性.

爱因斯坦发现,如果粒子数守恒,即使粒子之间完全没有相互作用,玻色子系统在足够低的温度下,会发生相变,即系统中有的粒子会达到零动量态.这就是所谓玻色 - 爱因斯坦凝聚(BEC).玻色并未发现这一点,因为他只讨论了光子.由于光子无静止质量,在系统能量下降时,他们可能消失.

我们应注意,爱因斯坦是在无限大三体体积的条件下预言 BEC 的.其时,在能量趋近于零时,系统状态的总数目变得极其小.因为在温度下降时,没有任何粒子消失,系统中绝大多数粒子只能在其基态积累,从而凝聚到最低能态.在热力学极限下,即粒子数与系统体积都趋于无限大时,就会经历这个相变.

可以形象地说,BEC 就像空气中的水蒸气,在温度下降时,会凝结为液滴.但是千万不要忘记,BEC 是发生在动量空间.在相变温度  $T_c$  时,只有少数粒子凝聚,直到绝对温度下 0K,才会完全实现 BEC.在 0K— $T_c$  之间,系统实际上是 BEC 态的粒子与未发生相变的粒子“共处”在一块儿.

一般来说,我们可以认为,在温度足够低的时候,玻色子系统的每个粒子,其德布罗意波的波长相互交叠,从而使各个粒子的行为趋于一致(瑞典科学院的公报颇富诗意地戏称之为“原子同声歌唱”),亦如构成一个“超原子(Superatom).

但是,直到 1995 年以前,真正意义上的 BEC 对于我们,只能像“梦幻般”的神话,存在于教科书上.人们一直未能观察到这种有趣现象.尽管超流、超导的发现,其中也显露与 BEC 极其密切的关系,但是它们毕竟不是 BEC<sup>[8]</sup>.

大体而论,玻色 - 爱因斯坦凝聚,与超流、超导都属于玻色子系统.但是超流和超导则是强关联的玻色子系统的现象,BEC 则是理想的无相互作用的玻色子系统所出现的现象.前者早在 1906 年和 1911

年就被人们所发现,而人们迟迟无法观察到 BEC 现象,原因在于 BEC 现象实现的条件远比超流、超导苛刻.实现 BEC,既要求凝聚的玻色子(原子)的德布罗意波彼此重叠,同时又要求玻色子(原子)的内部运动可以忽略.

我们知道,任何微观粒子同时具有波动性,即相应一定的德布罗意物质波,其波长与粒子动量成反比.如果要求诸玻色子(原子)的德布罗意波交叠,这些原子必然靠得很近,而由此又造成原子内部电子的很强的交换作用.因此,如果要忽略原子内部运动(效应),最好原子彼此远离,也就是要求考虑稀薄原子气体.此时,要德布罗意波彼此重叠,只有增大其波长.换言之,必须减少原子的动量,即降低系统的温度.我们必须充分降低温度,从而使原子的德布罗意波长有足够长,彼此重叠,进入相同的量子态——凝聚态(一般是能量最低点).爱因斯坦等研究表明,发生 BEC 的条件是:

$$\rho(\text{相密度}) \equiv n(\text{粒子数密度}) \times (\lambda_d^3) > 2.612$$

其中  $\lambda_d$  即粒子的德布罗意波长, 2.612 为一普适的临界数值.

可见,实现 BEC 的技术及关键是使玻色子(原子)气体的温度降到异常的低,这在 20 世纪 90 年代朱棣文等发现“光学粘胶冷技术”之前是可望而不可及的.

### 3 BEC 的实现

1968 年,前苏联科学家莱托霍夫(V. S. Letokhor)提出激光驻波捕获原子的思想,并给出激光陷阱的概念.1975 年,斯坦福大学的肖洛(H. A. Shawlow)、汉斯(T. Hänsch)小组与迪迈尔特(H. G. Dehmelt)分别独立地提出激光冷却原子的建议.从此激光控制、冷却原子就成为国际物理学界的现实目标.

1978 年,美国贝尔实验室的阿什金(A. Ashkin)导出一个原子与激光束共振时的压力公式,并且利用光压梯度实现原子束聚焦.1979 年,前苏联莫斯科光谱研究所的巴里金(V. I. Balykin)莱托霍夫等首次实现利用激光使钠( $^{23}\text{Na}$ )原子减速.尤其值得大书特书的是,贝尔实验室的美籍华裔科学家朱棣文领导的小组首次用激光将钠原子冷却到  $240 \times 10^{-6} \text{K}$ ,并将原子在所谓“光学粘胶”(Optical Molasses)中“囚禁”达 0.5s,这是划时代的一项技术成果.

大体而论,原子如果吸入与其运动方向相反的光子,就会减速.相继地,自发辐射的光子又会携带

动量,随机地向各个方向射出,会平均地降低原子运动速度.详细的分析表明,利用多普勒效应,可以做到原子吸收的光子动量总是与原子运动方向相反.适当地装配好三维激光组态,就会使原子在所有方向上都有减速作用,宛如将原子置于“光学粘胶”之中,受到粘滞阻力.这种基于“朴素的”多普勒效应冷却技术,由于自发辐射的反冲作用,实际上冷却所达到的温度有个限制<sup>[9]</sup>.

人们又附加很多新的技术措施,诸如偏转梯度冷却机制、磁感应冷却机制、速度选择相干态粒子数捕获机制、拉曼跃迁选择机制,等等<sup>[8,10]</sup>,以进一步提高冷却效应,获取更低的温度,这里不一一介绍.我们只指出,1986 年法国巴黎小组的达里巴德(J. Dalibard)提出,尔后为朱棣文及其合作者普里恰德(D. E. Pritchard)小组所发现的“磁光陷阱”法(magneto-optical trap, MOT).这种方法吸取了美国国家标准和技术研究所(NIST)的菲利浦斯(W. D. Philips)领导的捷德尔斯堡(Gaithersburg)小组在多普勒冷却的同时,再附加磁场捕获原子的思想,实际上构成有效磁陷阱,可以大范围捕获原子,同时将之紧紧囚禁起来.MOT 对于未来的发展意义重大.

我们已经知道,朱棣文、柯亨-塔努吉(C. Cohen-Tannoudji)、菲利浦斯,因为激光冷却方法及其理论研究中的卓越成就,获得 1997 年度诺贝尔物理学奖.

万事具备,只欠东风.科学家已掌握强有力获得超低温的技术手段,于是几路大军同时奔向实现 BEC 的战场,很快就传来捷报.

1995 年 6 月 5 日 10 时 54 分,美国在 Boulder 的科罗拉多大学的维曼教授与美国 NIST 的高级学者(开始为博士后)科耐尔,在科罗拉多大学与 NIST 的联合研究所中联合天体实验室中,首次观察到约 2000 个铷( $^{87}\text{Rb}$ )原子的玻色-爱因斯坦凝聚,持续时间约 15—20s,温度约  $1.7 \times 10^{-7} \text{K}$ .这是人类第一次观察这种奇特的物质形态,可以毫不夸张地说,这无异于打开科学发现与新技术发展的宝库的大门.

研究方案最早是由维曼制定的.他利用的是 MOT 法对铷原子进行冷却.他选择铷原子的原因是,铷作为重碱金属,只有一个价电子,核的自旋为奇数,两者耦合为具有整数自旋,其超精细结构,可以提供许多具有玻色性质的同位素.实验时首先在 MOT 陷阱中,用激光冷却的方法,将室温下气压为  $1.3 \times 10^{-9} \text{Pa}$  的原子铷的稀薄气体,冷却到几十微 K,即  $10^{-3} \text{K}$ .然后置于一个纯粹“磁陷阱”中.磁陷阱

是一个能约束原子的磁场.维曼、科耐尔利用一个转动势( top-time orbiting potential )作为陷阱.实际上是用一个较强的球形四极矩,再叠加一个较弱的横向均匀的旋转磁场.它能有效而又稳定地维持对铷原子的束缚(囚禁),其作用等效于一个轴对称的三维简谐位势,宛如将原子置于深井之中.然后利用蒸发冷却的方法,有选择地将能量较高(温度较高)的原子从“磁陷阱”中解脱出来,使之逃逸.维曼、科耐尔实际上是利用射频磁场来完成这种“解脱”——蒸发任务的.在磁阱中的铷原子气体的温度就不断迅速地下降.应该指出的是,附加特殊磁场是科耐尔的思想.

实验中凝聚是在胡萝卜状玻璃容器( glass cell )内进行的.细细的铷原子球( ball ),像樱桃( a cherry )置于凹处,其直径约  $20\mu\text{m}$ ,大约一张纸厚的  $15$  分之一.尽管范围极小,但毫无疑问是典型的宏观量子现象.分析表明,凝聚中包含的铷原子超过  $2000$  个以上.对照中的分析表明,凝聚开始时,铷原子都急剧下降,其温度都趋近于零,而且速度分布极其狭窄,速度为零或者几乎为零的原子数急剧增加.后者的运动方向有明显的趋同性.一切都表现出明显的 BEC 特征.

麻省理工学院克勒普奈尔( D. Kleppner )是有关领域的先驱者之一,他激动地说:“这是一项惊人的发现,简直让我透不过气来!照片显示的实验结果,清楚极了,非常令人信服.”牛津大学的伯耐特( K. Burnett )教授赞叹有加:“用‘圣杯’这个词来比喻这项发现的奇特和重要性,是极为恰当的”<sup>[69]</sup>.

科学界的欢呼尚未平息,更为壮观的 BEC 出现了.1995 年 9 月,以凯特利( Wolfgang Ketterle )、克勒普奈尔和普里恰德( W. Prichard )等为中心的 MIT 小组,利用激光和电磁装置冷却和约束钠原子气体( $^{23}\text{Na}$ ),奇迹般地使数以  $10$  万计的钠原子呈现玻色-爱因斯坦凝聚.由于凝聚物中包含更多的原子,更便于研究其物理性质.

必须指出,参与凝聚的原子处于相同的自旋态,因而原子自旋的翻转,会抑制 BEC.在磁阱中,中心处磁场消失,就会允许自旋态以不可控制的方式变化,即所谓玛约纳拉( Majorana )翻转.科耐尔提出转动磁场装置,使磁阱势“平均化”,致使磁阱中心处的磁场不再为零.这种 TOP 技术的发明,对于 BEC 成功产生作用甚大.至于 MIT 小组则应用强排斥激光束以填满磁阱中心处,这样也避免玛氏翻转.

截止 2001 年 9 月,全世界已有  $36$  个实验室成

功地在不同原子气中(铷原子、钠原子、锂原子、氢原子和亚稳氦原子等)实现了 BEC,并进行了范围广泛的实验,继续有不少重大进展和重要发展,可谓硕果累累.我国有四个小组:中国科学院上海光学精密机械研究所、北京大学、中国科学院武汉物理与数学研究所和山西大学正在积极地进行 BEC 实验的准备工作.

#### 4 BEC 物理研究进展

迄今为止,关于 BEC 现象的研究从实验到理论都取得了长足的进步,以至形成了一个新的物理学分支——BEC 物理学.在此,我们不去一一追述有关的不同碱金属气体实现 BEC 的实验细节.我们只想指出对 BEC 的研究,尤其是对铷原子的捕获和凝聚的研究,目前已有一个极好的理论基础,即所谓格罗斯-皮达耶夫斯基( Gross - Pitaevski )方程.

在实现 BEC 以后,科耐尔、维曼和凯特利又进行大量实验工作,揭示了 BEC 的宏观量子态的许多奇妙的物理性质.实际上,就是铷原子的 BEC 也远非当初爱因斯坦提出的自由粒子的凝聚.首先,粒子被捕获于一个有限区域,其数目有限,而不是一个无限的系综( assembly ).因此,不可能有一个热力学的单一相变.但是,如果系统有成百万个原子,问题也不大.系统的相变在实验上显示明确信号.其次,即使是稀薄气体,系统也与弱耦合相差甚大.禁闭在势阱中的原子用振动能量子( trap quanta )表征.在相应物理系统中,粒子之间的平均相互作用能,其数量级比振动能量子大  $1$  个数量级.这就意味着,凝聚态的波函数较之在势阱中无相互作用的基态的波函数覆盖面要大得多.但是,如果假定所有凝聚的原子所处的状态由其相互作用与磁阱势自洽地确定,就可以恰当地描述实验情况.甚至于可以描述凝聚中有微扰、激发时的动力学演化.可以证明,这样的理论框架与基于格罗斯-皮达耶夫斯基方程的研究方法完全等价.

在无相互作用的气体中,粒子彼此没有影响,所有原子只能占据相同的单粒子态,类似于光子的热力学分布.至于在势阱中的气体,其相互作用促使粒子发生关联,亦如在激光器中诱导光子的相干性一样.于是,可以预期凝聚体中会产生一种长程关联,并且在各个部分之间存在相相干性,从而引起许多可以观察的物理效应.对于有关效应、现象的观察和研究,科耐尔、维曼和凯特利作出巨大贡献.

科耐尔与维曼的玻尔德(Boulder)小组在足够低的温度下,用实验证实了在势阱凝聚中理论家所预言的元激发.他们显示“和应”(sympathetic)冷却现象.在此现象中,有两个分开的凝聚体形成,其中一个样品是由冷却所致,另一个样品则是由两部分碰撞能量的迁移而凝聚的.由此得到两个部分交叠的凝聚.

在凯特利领导的 MIT 小组发明了一种基于非共振光的成像法(imagine method),可以用非破坏方式探测凝聚体,从而直接观察凝聚体中许多随时间演化的动力学现象.凝聚体的相干性仍是 BEC 物理学最本质的属性,它可通过将凝聚体分为两部分进行研究.1997 年,MIT 小组首先将钠原子气体用激光冷却法,冷却到  $10^{-9}$  K,实现 BEC,然后将凝聚体分为两部分,让它们在重力作用下坠落膨胀后交叠,凯特利观察到两部分交叠呈现干涉条纹,这清楚地表明,即令在分开以后,它们依然保持相位相干性<sup>[13]</sup>.

1997 年 1 月 28 日,MIT 小组将钠原子的 BEC 凝聚体以原子滴(约 100 万个原子构成)形式无破坏性地从磁阱中取出.原子滴因重力下落,并逐步膨胀,形成一条宛如光束一样的同步原子束,即所谓原子激光(Atomic Laser).通常的激光由频率、位相、偏转均相同的光子构成,而原子激光则由量子状态完全相同的原子构成.正如后来实验证明,其干涉性、单色性比普通激光更好.

凯特利小组还研究凝聚体形成和破坏的动力学、凝聚体的临界速度以及凝聚体中的畴状结构(类似于固体中的磁畴和电畴).他们最近还观察到, JILA 小组早先发现的在凝聚体中显示的涡旋结构,甚至观察到 100 余个涡旋.

总而言之,目前的研究表明,确实发现了典型的 BEC 现象,观察到凝聚的许多独特和鲜明的表征,实验与理论符合.

目前,已有 20 多个小组成功地在磁阱中产生铷原子的 BEC.铷原子系统的许多特性已为人们所研究,例如,凝聚体的相干外耦合,利用所谓费西巴赫(Feshbach)机制对凝聚态进行操控,利用光学(optical)晶格模拟固态效应,由 MIT 等进行的原子激光的相干放大<sup>[13,14]</sup>,美国国家标准技术研究院的菲利普斯小组观察到类似于非线性光学的原子非线性激光,即在凝聚态中相干波函数的四波混频(Four-way mixing of the coherent wave function)<sup>[16]</sup>,等等.

最近法国巴黎的两个小组<sup>[15]</sup>和布鲁塞尔的一个小组<sup>[16]</sup>分别独立地用亚稳氦(He)原子产生 BEC,

凝聚体寿命长,且未形成分子.该系统展示出许多令人激动的发现的可能性.

利用激光冷却,在 JILA 的 Jin 博士和另外一个小组<sup>[17]</sup>,将费米子气体冷却到量子相关性起主导作用的极低温下.原子系统取决于核自旋态,同一样品,可以显示玻色性,也可以在自旋态变化时显示费米子的性质.费米子系统固然不会经历 BEC,但其低温行为依然有巨大研究价值.根据泡里原理,费米子系统按能级排列到极大值,即费米能.由于这一限制,导致某些可能的量子过程的冻结.这也可以解释,为何对费米气体蒸发冷却法无效.类似于金属超导,费米子气体也可能获得基于粒子配对进入有序空间.

JILA 小组利用费而巴赫共振证明,粒子相互作用的正负符号(即吸引、排斥)可以突然变化(switched),导致凝聚体像超星一样猛烈膨胀<sup>[18]</sup>.因为费米子原子系统即使在绝对零度下也不会进入能量最低态.美国莱斯(Rice)大学的胡勒特小组观察到费米子原子受到一种压力<sup>[19]</sup>.实际上,这就是在白矮星中内部压力的实验室模拟.可见,BEC 现象的研究与天体物理的研究有密切联系.

BEC 原子系统提供了物理实验的奇特、妙不可言的介质.实验表明,其相关行为可以用作将量子效应扩展到宏观尺度.此时宏观量子现象并不是直接出自 BEC,而是将 BEC 作为介质时出现的.可以预期,这些工作可以应用到许多技术领域.事实上,利用原子的 BEC 将成为一种实验室里的标准技术.

原子 BEC 的最直接的应用恐怕就是高精度的测量.朱棣文及其同事早就制成慢速超冷原子干涉仪,可以测量重力加速度,精度达到  $3 \times 10^{-7}$ ,逐渐提高到  $10^{-11}$ .BEC 原子的干涉仪在理论上精度达到  $10^{-16}$ — $10^{-17}$ 是没有问题的.从科学上来说,精密测量对于广义相对论、引力量子理论(引力波的检测)的验证具有决定性的意义.由于地球的局部重力变化,有助于探测地球的地质结构,因此重力加速度  $g$  的测量为探矿(例如寻找含油层)提供准确信息.此时,以原子激光为基础的原子钟,其精度会将目前的  $10^{-13}$ 提高到  $10^{-16}$ — $10^{-17}$ ,直接导致全球 GPS 定位系统定位精度的相应提高,从而对航天、航海等产生巨大影响.

相干仪也可以作为传感器.同时由于原子激光(或译作原子激光)的波长只有普通激光的  $10^{-1}$ — $10^{-2}$ .如果能以 BEC 为基础的“原子激光”替代普通激光,作为对微电子学中的芯片进行“光刻”的工具,

微电子学器件的微型化、芯片的集成度和运算速度都会大大提高。目前 64 兆位的集成电路的芯片条宽为  $0.3\mu\text{m}$  的尺宽；1000 兆位的特大规模集成电路的芯片的条宽就会减小到  $0.1\mu\text{m}$ 。这时，用普通激光“光刻”已达极限了，因为激光波长的数量级就是  $0.1\mu\text{m}$  左右。换言之，目前的“光印刷术”（Lithography）已达极限。但用“原子激光”，条宽有可能小到  $10^{-2}$ — $10^{-3}\mu\text{m}$ ，亦即集成度可能提高几十倍！

目前人们已找到几种使 BEC 中超冷原子被“轻推”释放、集聚成束的方法。这就打开了创造“超微计算元件”（chips）的新技术大门，最后会建造出纳米级的单原子器件。

BEC 与当前热点领域量子通信有非比寻常的关系。首先两者的研究关键技术都是激光冷却。量子计算、量子计算机必须在超低温环境下进行研究。往往是同一研究小组同时进行两方面研究工作。例如 NIST 的诺贝尔奖得主菲利普斯在 BEC、单原子器件等方面都是先驱者。量子通信与 BEC 的研究难分难解。

BEC 的研究刚刚开始；“原子激光”才初试啼声。一个可连续工作的“原子激光器”尚待研制。但是，放眼看去，其前景十分诱人。BEC 的发现被授予 21 世纪的第一个诺贝尔物理学奖十分恰当。它似乎是物理学天空的第一只燕子，预示着又一个物理学春天即将来临。

### 参 考 文 献

[ 1 ] Bose S N, *Physik Z.* 1924 26 :178  
 [ 2 ] Einstein A, *Sitzber. Kgl. Preuss. Akad. Wiss.* 1924 p. 24 ;1925 p. 3

[ 3 ] Anderson M H, Ensher J R, Mathews M R *et al.* *Science*, 1995, 269 :198  
 [ 4 ] Petrich W, Anderson M H, Ensher J R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 74 :3352  
 [ 5 ] Davis K B, Mewes M O, Andrews H R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 75 :3696  
 [ 6 ] Hau L V, Harris S E, Dutton Z *et al.* *Nature*, 1999, 397 :594  
 [ 7 ] Liu C, Dutton Z, Behroozi C H *et al.* *Nature*, 2001, 409 :490  
 [ 8 ] 陈徐宗, 周小计, 陈帅等. *物理*, 2002, 31(3):14 [ Chen X Z, Zhou X J, Chen S *et al.* *Wuli (Physics)*, 2002, 31(3):14 (in Chinese)]  
 [ 9 ] 张端明. *物理学与高新技术*. 武汉:湖北教育出版社, 1998. 131—154, 221—222 [ Zhang D M. *Physics and High Technology*. Wuhan: Hubei Education Press, 1998. 131—154; 221—222 (in Chinese)]  
 [ 10] 张端明. *世纪之交的物理学*. 武汉:湖北科技出版社, 1999. 191—196, 206—207 [ Zhang D M. *Physics at the Turn of the Century*. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1999. 191—196, 206—207 (in Chinese)]  
 [ 11] Bradley C C, Sackett C A, Hulet R G. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 78 : 985  
 [ 12] Fried D G, Killian T C, Willmann L *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 81 :3811  
 [ 13] Andrews M R, Townsend C G, Miesner H J *et al.* *Science*, 1997, 275 :637  
 [ 14] Mewes M O, Andrews M R, Kum D M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 78 :582  
 [ 15] Inouye S, Pfau T, Gupta S *et al.* *Nature*, 1999, 402 :641  
 [ 16] Deng L, Hagley E W, Wen J *et al.* *Nature*, 1999, 398 :218  
 [ 17] Demarcq B, Jin D S. *Science*, 1999, 285 :1703  
 [ 18] Cornish S L, Claussen N R, Roberts J L *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 85 :1975  
 [ 19] Truscott A G, Shecker K E, McAlexander W I *et al.* *Science*, 2001, 291 :2570

· 信息服务 ·

## 招 聘 启 事

中国科学院化学研究所有机固体重点实验室理论物理与化学课题组，从事有机材料的光电性质、分子器件的理论设计、分子激发态与电荷转移，以及其他领域的基础理论研究。负责人帅志刚，在比利时工作 12 年，刚回国。课题组将与化学所的实验化学家广泛合作。

课题组拟招聘副研究员 1 名，博士后两名，硕士、博士研究生各两名。

招聘条件：凝聚态理论、固体理论、理论化学专业，有一定数值计算经验。

联系人：帅志刚 北京市海淀区中关村北一街 2 号，中国科学院化学研究所（邮编 100083）

Http://morris.umh.ac.be/Zhigang/cvshort.htm E-mail: zgzshuai@infoc3.icas.ac.cn

电话：010-62521934（办公室），13021024258（手机）