

# 2001年诺贝尔物理奖

林 晓 满

(北京工商大学数理部 北京 100037)

根据瑞典皇家科学院 10 月 9 日发布的消息,今年的诺贝尔物理奖涉及一种新的物质形态,玻色-爱因斯坦凝聚态。获奖的 3 位科学家分别是美国科罗拉多州博耳德的实验天体物理联合研究所(JILA)和国家标准与技术研究所(NIST)的埃里克·康奈尔(Eric A. Cornell)、美国马萨诸塞州坎布里奇麻省理工学院(MIT)的沃尔夫冈·克特勒(Wolfgang Ketterle)、美国科罗拉多州博耳德的实验天体物理联合研究所和科罗拉多大学的卡尔·韦曼(Carl E. Wieman)。他们在碱原子稀薄气体中获得了玻色-爱因斯坦凝聚物,并对这种凝聚物的特性进行了早期的基础研究。

## 物质新形态:玻色-爱因斯坦凝聚态

我们周围的物质都由原子构成,原子遵循量子力学规律。在通常温度下,它们往往和经典的观念相一致,气体中原子彼此之间以及它们和容器壁之间的行为就像一群不断相互碰撞的台球。然而,当温度降低和原子的速率减小时,它们的性质将越来越多地由量子力学规律来支配。原子还围绕自己的轴线在旋转,也就是说它们有自旋。原子的自旋用自旋量子数来描述,自旋量子数可取整数或半整数。自旋为整数的粒子称为玻色子,自旋为半整数的粒子称为费米子。玻色子的行为显示出很强的“社会”性,在低温下它们会努力聚集到能量最低的同量子态。而费米子则互相回避,它们完全不可能处于同一量子态,因此能量较高的状态也是必然会存在的。正是由于原子壳层中的电子是费米子这一事实,元素在周期表中的排列才得到了很好的理解。

早在 1924 年,印度物理学家玻色(S. N. Bose)对光子进行了统计分析,用纯粹的统计方法导出了普朗克的热辐射规律,并把他的工作寄给爱因斯坦。从此就开始有了以他的名字称呼的玻色子。爱因斯坦立刻意识到这一工作的重要性,并把它翻译成德文发表。同时,爱因斯坦又迅速地把这一理论推广到所有有质量的玻色子,接连发表了两篇论文,并预言当大量粒子在彼此足够接近、运动足够缓慢的情况下,它们将一起聚集到最低的能量状态,这就是我

们所说的玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)。

自从这一开创性的工作发表以来,物理学家们一直希望能够获得这种新的物质基本形态,并期望它有很多有意义和有用的特性。70 年过去了,康奈尔、克特勒和韦曼在 1995 年用非常先进的方法终于实现了这一愿望。他们是在碱原子气体中获得这一物质形态的,在这种气体中可以用非常纯粹的方式研究这一现象。在宇宙中还没有其他地方能找到这样的极端状态与稀薄气体中的 BEC 相当。早些时候,已经在比较复杂的系统中观察到玻色-爱因斯坦凝聚现象,例如在超导体完全没有电阻)中电子对的凝聚和超流体(流体中没有内部摩擦),在这两种凝聚现象中低温也都是必须的。在这些研究领域中已经获得过好几个诺贝尔物理奖。这些量子力学系统并不像碱原子气体那么简单,因为这两种凝聚现象只涉及系统的一部分,并且强相互作用往往会掩盖 BEC 现象。

## 是波还是粒子

根据支配微观世界的量子力学规律,粒子的行为就像波一样的,例如大家所熟悉和使用的电子显微镜。早在 1924 年,德布罗意就假定物质波的存在,并用粒子的动量  $p$  来表示它的波长  $\lambda$ :

$$\lambda = h/p$$

这里  $h$  是普朗克常数。粒子运动越慢,它的动量越小,德布罗意波长就越长。根据气体分子动力学理论,粒子速度越慢,温度就越低。如果能产生足够稠密的冷原子气体,则粒子的物质波波长将和它们的间距具有相同的数量级。不同粒子的物质波就能互相“感觉到”并能协调它们的状态,这就是玻色-爱因斯坦凝聚。有时候我们说“超级原子”形成了,这是因为整个复合体系就像单个原子一样,用一个简单的波函数就能精确地描述。我们也可以说凝聚物质,这与激光是凝聚光的说法是一样的。

通常,气体冷却时将凝结成液体。今年的诺贝尔物理奖得主指出了用碱原子是可以避免这种情况发生的。对质量数为 87 的铷( $^{87}\text{Rb}$ )和纯的稳定同位素钠( $^{23}\text{Na}$ ),它们都具有整数的原子自旋,对这两种情

况,原子之间都会出现弱的排斥力。可以证明,如果用—个波长  $\lambda$  为边长的立方体内的原子数来表示的原子数密度超过 2.6, BEC 就会发生。计算表明,对现实的原子密度,原子的运动必须非常缓慢,其速率为每秒几个毫米的数量级,这大约相当于 100nK 数量级的温度,即绝对温度零上百万分之十度。今年的诺贝尔物理奖得主通过激光冷却并陷俘中性原子的方法实现了玻色-爱因斯坦凝聚。朱棣文、科昂-塔努基和菲利普斯因他们在激光冷却和陷俘原子方面的贡献而荣获 1997 年的诺贝尔物理奖。

### 激光冷却和蒸发冷却产生 BEC

中性原子的激光冷却方法是 1975 年由汉斯(T. W. Hänsch)和肖洛(A. L. Schawlow)提出的。其基本原理是让光子和原子交换动量。冷却作用是通过这样一种安排来实现的,在这一安排中,只有当光子与飞行的原子迎面对撞时才被原子吸收。原子吸收光子后,速度就会减小而发生冷却作用。然而,原子的速度只能减小到一个极限值,称为多普勒极限,这个极限速度是由自发辐射的随机性决定的。1997 年诺贝尔物理奖得主已经证明,通过改进过程是可以克服多普勒极限的,从而达到更低的温度。然而要想把一群冷原子俘获在一起,还必须用所谓的原子陷阱。这通常是由激光束和磁场联合起作用的磁-光陷阱(MOT)。已经有若干个研究小组把这种技术用于 BEC 的研究。然而,麻省理工学院的克莱谱纳(D. Kleppner)研究组和格雷塔克(T. J. Greytak)研究组使用的蒸发冷却方法是进一步冷却原子所必需的技术。所谓蒸发冷却就是让运动最快的原子一个接一个地离开团体,从而降低剩余原子的平均温度,这与杯子中咖啡的冷却方式是相似的。原子陷阱中的原子是用磁偶极力维持的。如果原子的磁极发生反转,吸引力可以转变为排斥力,原子磁极的反转可用射频场来实现。麻省理工学院的普里特查德(D. E. Pritchard)提出了一种有效的方法。最快的原子在陷阱边缘的高处运动,那里有强磁场和很高的磁极转换频率。如果在开始时运用高频而后逐渐降低频率,就可以连续撇掉那些热原子。1995 年 6 月由康奈尔和韦曼领导的 JILA 小组第一次在铷中达到了凝聚极限。他们要克服的最后一个困难是避免陷阱中心的原子丢失,因为在没有磁场的陷阱中心,原子的磁极是可以自发转换的。只要在样品上加上足够迅速的旋转磁场,就可以阻止原子从陷阱中涌出。

大约在 1990 年,韦曼拟定了在碱原子中实现

BEC 的方案。这个方案的重要思想是在磁-光陷阱中用激光来冷却原子并把它们转移到纯磁性陷阱中,然后再应用蒸发冷却达到必需的低温。康奈尔是被韦曼雇来从事这项科研工作的,他开始是“博士后”,但很快就被 NIST 永久雇佣。在 JILA 的实验中,一个引人注目的实验结果如图 1 所示,这一凝聚过程大约在 170nK 的温度时开始发生。通过更有效的蒸发冷却后,在 20nK 的温度时得到了纯粹的凝聚物,那时样品中大约保留着 2000 个原子。

图 1 展示的是在陷阱中的限制力突然关闭后得到的图像,图像中的云团在膨胀,越冷的原子膨胀得越缓慢。云团的轮廓是在预定的延迟以后用共振激光来做的,温度是根据这期间云团所达到的尺寸来计算的。这个图像给出了原子在云团中的分布,它是根据阴影计算出来的。

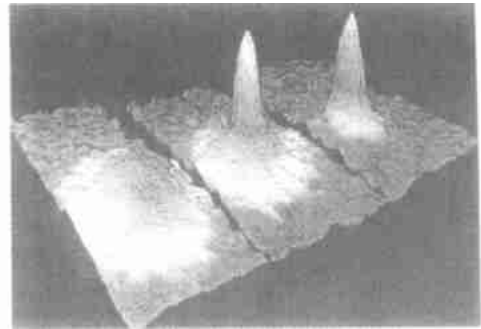


图 1 在铷中连续发生的玻色-爱因斯坦凝聚。从左到右显示了凝聚前、开始凝聚时和完全凝聚后原子在云团中的分布。高峰对应于大量原子。膨胀的原子云团的轮廓是在原子陷阱中的限制力关闭后 6 毫秒记录的。

科罗拉多小组的克特勒用吸收和发射黄光的钠原子独立地进行了这项研究。他于 1990 年来自德国,是麻省理工学院普里特查德(D. Pritchard)小组的博士后,并于 1993 年在 BEC 项目中负主要责任。克特勒通过聚焦在陷阱中心的强大激光束来阻止原子的丢失,从而解决了陷阱中心的原子丢失问题。在 JILA 小组的实验结果公布后仅仅 4 个月,他就发表了钠的 BEC 结果。克特勒展示的资料和图 1 类似,不过在他得到的凝聚物中包含的原子数就更多了。由于凝聚物中的原子数增加了数百倍,使得测量凝聚物的性质成为可能。例如让两个分离的凝聚物彼此扩展,就能清楚地显示出物质波的干涉效应(图 2)。克特勒还用实验说明了部分凝聚物以‘BEC 滴’的形式一个接一个地从陷阱中引出来并在重力场中降落的情况(图 3)。这种现象被认为是凝聚物质的原子激光,这与激光的脉冲发射是类似的。

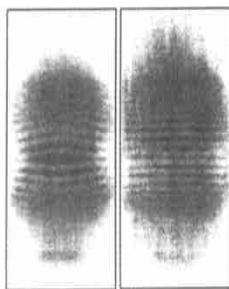


图2 在两个相互重叠的钠原子玻色-爱因斯坦凝聚物之间的干涉图案。图像是用吸收产生的。物质波的干涉有15微米的周期性。资料说明了两个凝聚物的原子是完全同等的。



图3 从陷阱中不断释放出的钠原子玻色-爱因斯坦凝聚物。凝聚物质的脉冲在重力场中降落,这种现象被看做是原子激光效应。此图的实际大小是 $2.5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 。

### BEC领域的蓬勃发展

自从JILA小组和麻省理工学院小组公布了在铷和钠中获得BEC的实验结果以来,这个领域有了蓬勃的发展。目前已有20多个研究组在做BEC实验。特别值得一提的是赖斯大学的赫尔特(R. G. Hulet)小组,他们是用同位素锂( $^7\text{Li}$ )进行这项研究的,当两个锂原子彼此接近时,就会有吸引力出现,这与 $^{87}\text{Rb}$ 和 $^{23}\text{Na}$ 的情况正好相反。在1997年一个刊物中,该小组清楚地展示了一个大约有1000个原子的小凝聚物,与理论的预言完全一致。

虽然有很多小组已经进入这个研究领域,但康奈尔、韦曼小组和克特勒小组仍然保持着他们的领先地位,并给出了很多有意义的新结果。例如JILA小组研究了凝聚物中的集体激发和旋涡结构。克特勒小组提出了一种使凝聚物成像的改进方法,由于它不受测量的影响,因而可以进行多次的重复测量。

在原子之间的作用力中也已观察到与磁场相关的共振,并且强烈影响着凝聚物的性质。此外,这个小组还证明了原子激光束也是可以放大的,这与激光束完全类似。马里兰州NIST的菲利浦(W. D. Phillips)小组也在研究用物质波来验证与非线性光学的四波混合相对应的现象。

稀薄气体中BEC的早期实验研究是在麻省理工学院的克莱普纳小组和格雷塔克小组中用自旋极化氢原子开始的,但是要达到适当的凝聚条件却非常困难。然而在JILA小组发表第一篇文章3年之后,氢的BEC结果也终于发表了。在BEC的研究中,克莱普纳的灵感起到了开创性的重要作用。近来巴黎有两个研究小组进一步把BEC的研究扩展到更多类型的原子,他们已经报告了亚稳态氦原子的凝聚。

稀薄气体的玻色-爱因斯坦凝聚为研究基本的量子力学过程提供了很大的可能性。在这个领域中正在进行着极其广泛的实验研究和理论研究,例如非线性过程和控制光传播速度的研究。这些研究对其他研究领域也产生着很大的影响。近来JILA小组已经证明,用上面提到的共振方法可使原子之间的吸引力和排斥力进行快速转换,从而有可能导致 $^{85}\text{Rb}$ 凝聚物的溶解,这很像一个超新星(玻色-新星)的溶解。JILA的吉恩(D. Jin)和他的同事们在极低温度下对费米子BEC的相关现象的研究,将会展现物理系统中统计状态的新方向,并预示未来将有可能观察原子对的形成和超流动性。赫尔特(R. G. Hulet)小组指出,在简并原子的费米气体中,由于费米子的相互排斥而出现一个向外的压力,从而可以模拟白矮星中那些类似的状况。

气体中的BEC现象将可能用于基本自然现象的精确测量,因为那里的原子基本没有运动,有着尖锐的共振或尖锐的物质干涉条纹。BEC在平版印刷术、纳米技术和全息术中的革命性应用看来就要来到。

### 作者简介



林晓满,1960年就读于中国科学技术大学近代物理系,1965年毕业后留在该系从事理论物理、量子场论等课程的教学和基本粒子理论研究工作。后调入北京轻工业学院(现已组建为北京工商大学)从事基础物理课程的教学工作。