



玻色—爱因斯坦凝聚

——一种新的宏观物质状态

王文贇 刘保义

(天水师范学院物理系 甘肃 741001)

2001年10月9日,瑞典皇家科学院宣布,2001年诺贝尔物理学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岁的教授康奈尔(E. A. Cornell)和50岁的教授维曼(C. E. Wieman)以及美国麻省理工学院(MIT)43岁的德裔教授凯特勒(W. Ketterle),以表彰他们“在稀薄的碱金属气体中成功地获得玻色—爱因斯坦凝聚,并对凝聚体特性进行的早期基础性研究”方面的杰出贡献。何为玻色—爱因斯坦凝聚?科学家们在实现玻色—爱因斯坦凝聚过程中进行了怎样的探索?研究玻色—爱因斯坦凝聚有何意义?本文试图就上述问题作一简要阐述。

1. 玻色—爱因斯坦凝聚——一种新的宏观物质状态

1924年,年轻的印度学者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,导出了普朗克黑体辐射公式,他将论文寄给爱因斯坦,期望得到后者的认同。爱因斯坦马上认识到该文的价值,立即将其译成德文发表。随后,爱因斯坦将玻色的方法成功地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、热运动速度足够慢时,将发生相变,变成一种新的物质状态,后人称之为玻色—爱因斯坦凝聚(BEC)。

按照量子统计学原理,有两种统计律,一种称为费米—狄拉克统计律,一种称为玻色—爱因斯坦统计律。遵从前一种统计律的粒子称为费米子,遵从后一种统计律的粒子称为玻色子。费米子有很强的排他性,在一个量子态只能有一个费米子,而玻色子却有很强的“协同性”,在一个量子态可以有众多玻色子。处于BEC态的物质,所有玻色子都处于同一能量最低的状态,并且有相同的物理特征,它是一种由微观粒子的量子性质所产生的宏观现象。就原子而言,只要其总自旋为整数,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征(每个原子都具有各自不同的运动特征,需要用不同的波函数来描述)。当温度降至足够低时,本来各自

独立的原子会变成一群“统一性”的原子(它们只需要一个波函数来描述),“凝聚”在一个相同的量子态,这就是当年爱因斯坦描绘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,引起广大物理学工作者的关注,大家期待着在真实的原子气体中实现BEC。然而,由于该实验难度很高,经过整整70多年的努力,直到1995年,才由JILA的康奈尔、维曼小组和MIT的凯特勒小组在实验中真正获得了BEC。

2. 实现玻色—爱因斯坦凝聚的探索

2.1 超流与超导

在爱因斯坦预言BEC之后,众多科学家纷纷在实际物质中探索BEC迹象。大家首先注意到的是氦⁴He,它在温度2.17K以下时,具有超流现象。该现象于1911年首先被昂内斯发现,并由此获得1913年诺贝尔物理学奖。1938年伦培指出,超流可能是氦原子的BEC态;但以后相当长一段时间,科学家们无法将超流的物理特性和BEC直接联系起来。1950年,彭罗斯等人研究超流的长程作用时,才发现超流具有玻色系统的某些性质。由此,他们推断,在超流氦中约有10%的原子具有BEC特性。但超流氦中存在着很强的相互作用,这使它的性质同无相互作用的理想气体形成的玻色—爱因斯坦凝聚体的性质很不一致。尽管如此,液氦在温度2.17K发生相变的现象在某种意义上和爱因斯坦提出的凝聚颇为相似。

同低温液氦中粘滞力消失形成超流相似,某些金属在低温下会失去电阻形成超导,这一现象于1911年首先被昂内斯发现。但解释该现象的理论于1952年才由巴丁等人提出,该理论指出,在极低温下,金属中自旋相反的两电子之间存在着很强的关联,形成“库珀”电子对,这种电子对对周围环境极不敏感,环境几乎对其无作用,因此电阻就消失了。尽管单个电子是费米子,但由他们形成的电子对却同玻色子相似,超导的相变与BEC相似。但超

现代物理知识

导系统毕竟是强关联系统,因而它的性质同无相互作用的玻色凝聚体系相差较远。

2.2 激光冷却、囚禁原子

1960年激光的发明为冷却、囚禁气体原子提供了一种新方法。1975年美国斯坦福大学的黑斯克等人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迎面射来的激光束中的光子,由于原子运动所产生的多普勒效应,使其吸收频率比原子跃迁中心频率低的光子,随后原子又辐射出频率和其跃迁中心频率相同的光子,这样运动原子吸收频率偏低、因而能量偏低的光子,放出频率偏高即能量偏高的光子,入不敷出,根据能量守恒律,原子必须减少自己的动能以补充上述能量之差。由于吸收和放出光子的过程可在极短时间(10^{-8} 秒)内完成。这个过程不断重复,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,从而使系统温度降至极低,因而激光冷却是一种效率极高的冷却方法。前苏联科学院光谱学研究所的贝利金等人和美国国家标准和技术研究所的菲利普斯,分别于1950年在实验上成功地冷却了钠原子束。随后,菲利普斯和当时在美国贝尔实验室的华裔学者朱棣文与法国巴黎高等师范学院的科恩-塔努基发展了一系列激光冷却的新方法。为此,他们3人分获1997年诺贝尔物理学奖。

为了更有效地实施激光冷却,科恩-塔努基教授的学生达利巴德提出一套冷却和囚禁原子的新方法——磁光阱(MOT)。该方法的基本原理是用一对反亥姆霍兹线圈提供磁场并用6束(上下、左右、前后)对射的圆偏振激光束辐照原子,使得处在磁场中央的原子主要接受向中心辐射的光子,从而在中央形成一个较深的势阱。原子可以较长时间地束缚在阱中,并被激光不断冷却至 μK 量级。这种方法由美国麻省理工学院的普里查德和朱棣文合作在实验上首先实现,从而开创了在气室中直接冷却和囚禁原子的历史,为后来最终实现 BEC 奠定了基础。

2.3 “蒸发”冷却

在 MOT 中冷却、囚禁原子,一般只能冷却到 μK 量级,在此温度下,还未形成 BEC,仍需进一步冷却。科学家们巧妙地在此阱中加上射频场,从高频至低频扫频,将动能高的原子从磁阱中剔除出去,留下动能低的原子在阱中,使磁阱内温度进一步降低。这种方法的原理恰如一杯热水,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,因此称为射频“蒸发”冷却。

美国 JILA 的研究人员从 1990 年起开始了在气室中实现铷 ^{87}Rb 原子 BEC 的尝试,他们应用了上述激光冷却、囚禁原子的 MOT,然后又通过射频“蒸发”冷却,使铷原子系统的温度降至 100nK 以下,终于在 1995 年成功地实现了铷原子的玻色-爱因斯坦凝聚。几乎同时,美国 MIT 的普里查德小组,用类似的方法实现了钠 ^{23}Na 原子的 BEC。

玻色-爱因斯坦凝聚,之所以在碱金属原子首获成功,其根本原因在于,碱金属原子的结构可看做由原子实和一价电子构成,该价电子的自旋为 $1/2$,原子实内的芯电子满壳层结构,总自旋为 0,因此,只要核的自旋为半整数,原子就为玻色子。上述铷、钠原子,正是这样的玻色子。

3. 研究玻色-爱因斯坦凝聚的意义

玻色-爱因斯坦凝聚是一种新的宏观物质状态。物质处于 BEC 态,有许多性质是其他状态未曾有的,值得我们去深入的研究。如 BEC 的相干放大机制,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 中实现压缩态, BEC 中约瑟夫森效应的宏观量子特性等。BEC 作为一种新的物质状态,研究其自身的物理性质以及形成这些性质的物理过程,本身就具有重大的科学意义。同时,由于 BEC 态是一种极端状态,通过对这种状态物质性质的研究,可以去认识、检验自然界的一些已有规律,完善或探索新的规律。

研究 BEC 除了对基础研究有意义外,对应用研究也有意义。BEC 实验会用到现代技术的最新成果,它涉及超高真空技术(约 10^{-9}Pa)、激光稳频技术、激光频率精密控制技术、射频技术、磁阱技术及多路信号时序控制技术。BEC 的实现既对上述技术提出了要求,同时也促进了上述技术的发展。此外在 BEC 基础上形成的原子激光,有可能使现有的原子钟精度得到极大提高,推动原子显微镜、原子全息术的发展,从而达到以极高的精度将原子沉积在固体表面,在原子水平上操控物质,加快纳米技术的发展。BEC 的研究成果还将推动相关领域的发展,如高精密度测量、量子信息处理、原子集成电路及原子刻蚀技术等。21 世纪, BEC 的研究领域将会更加宽广。