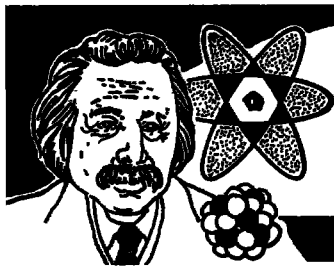


# 玻色-爱因斯坦凝聚的实现及应用

茅奕

玻色-爱因斯坦凝聚 (Bose-Einstein Condensation, 简称 BEC) 是爱因斯坦于 1925 年预言的奇特的凝聚现象。70 年过去了, 人们一直在寻找可能的 BEC 候选者。近 20 年来, 随着碱金属原子的激光冷却和囚禁技术取得的巨大进



展, 高密度大数目产生超冷原子气体已成为可能, 在此基础上, 1995 年, 3 个美国研究小组相继实验实现了碱金属原子气体 BEC, 震惊了整个物理学界。BEC 是物理学家长期梦寐以求观察的物理现象, 它的实现带来了广阔的应用前景。本文将对产生 BEC 的物理条件, 实验技术和研究历史作详细介绍, 并简述 BEC 研究的近期发展和重要应用——原子激光器。

## 一、BEC 形成的物理条件和研究历史

BEC 指的是一种相变, 在相变中宏观数量的玻色子处于相同的量子态上; 通过相变处于高度简并量子态的玻色系统, 有时也称为 BEC。

对于由全同玻色子组成的理想玻色气体系统, 体系的总粒子数  $N$  为

$$N = N_0(T) + \int_0^{\infty} n_{\epsilon} D(\epsilon) d\epsilon, \quad (1)$$

其中  $N_0$  是体系基态  $\epsilon = 0$  上的粒子数,  $n_{\epsilon}$  是理想玻色系统的分布函数, 满足玻色-爱因斯坦分布,  $D(\epsilon) d\epsilon$  是在  $\epsilon - \epsilon + d\epsilon$  能量间隔内的量子态数目, (1) 式第二项为所有  $\epsilon \neq 0$  的能态上的粒子总数。当温度足够高时,  $N_0$  与总粒子数  $N$  相比是极小量, 可以忽略; 但在足够低的温度下,  $N_0$  的贡献会变为宏观有限而不可忽略。经过分析我们会发现, 存在一个临界温度  $T_c$ , 在  $T < T_c$  时,  $N_0 > 0$ , 即玻色子将在基态迅速大量聚集; 当  $T \rightarrow 0\text{K}$  时, 粒子将全部聚集到体系的基态

上, 这种现象称为玻色-爱因斯坦凝聚 (BEC)。当 BEC 形成时, 将有宏观数量的粒子处于  $\epsilon = 0$  (也对应粒子动量为零) 的最低能态上, 即是“动量空间中的凝聚”; 如果该玻色系统处于外势场中, 也会在坐标空间中发生凝聚。图 1

反映了在三维立体箱中的理想玻色气体形成 BEC 的情况。

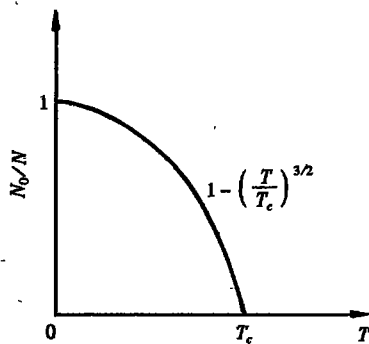


图 1 三维立体箱中的 BEC

当  $T < T_c$  时, 体系可视为两相的混合。其一是正常相, 粒子分布于各激发态; 另一个是凝聚相, 由凝聚于基态的粒子组成。

当  $T \rightarrow 0\text{K}$  时, 体系只呈现凝聚相 ( $N_0/N \rightarrow 1$ )。

临界量  $T_c$  及  $N_0/N$  随温度  $T$  变化的关系, 是与外加的空间变化势场有关的; 能量与空间的耦合会改变形成 BEC 的物理条件。确定  $T_c$  最简单的例子是系统处于体积  $V$  的三维箱中, 此时  $D(\epsilon) = 2\pi V h^{-3} (2m)^{3/2} \epsilon^{1/2}$ 。如果我们引入一个与粒子德布罗意波长同量级的“热波长”,  $\lambda = \sqrt{2\pi\hbar^2/mkT}$  (其中,  $k$  是玻耳兹曼常数,  $\hbar = h/2\pi$ ,  $h$  是普朗克常数,  $m$  是粒子质量,  $T$  是系统的热力学温度), 则当  $T < T_c$  时, 对应热波长  $\lambda$  将足够长, 使得

$$\rho = \lambda^3 \left( \frac{N}{V} \right) > 2.612,$$

( $\rho$  称为无量纲相空间密度) (2)

BEC 将会产生。(2)式等价于

$$\lambda > \left( 2.612 \frac{V}{N} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

其物理意义是粒子的德布罗意波长超过粒子间距。由此确定形成 BEC 的临界参量即临界温度和临界密度,它们分别为

$$T_c = \alpha \left( \frac{N}{V} \right)^{2/3}, \quad \left( \frac{N}{V} \right)_c = \left( \frac{T}{\alpha} \right)^{3/2}, \quad (4)$$

$$\text{其中 } \alpha = \frac{2\pi\hbar^2}{km} (2.612)^{-2/3}.$$

形成 BEC 要求  $T < T_c$  或  $N/V > (N/V)_c$ , 由此我们看到两条途径形成 BEC, 一是降低原子气团的温度, 二是提高原子气团的密度。对于几种碱金属原子, 密度在  $10^{12} - 10^{14} \text{cm}^{-3}$  量级时,  $T_c$  在  $\mu\text{K}$  或  $10^{-7} \text{K}$  量级。这样的低温只能使用激光冷却和捕陷技术才能达到。

纯的 BEC 要求理想的玻色气体系统发生凝聚, 即玻色子之间没有相互作用, 但很难找到这样的系统。1947 年提出的超流态液氮, 确实看到了量子简并的特性, 但由于该系统中强的相互作用导致 BEC 相变的纯粹量子统计特性复杂化, 所以难以看成纯的 BEC。1959 年有人提出自旋极化氢原子气体可能是 BEC 候选者, 因为这是最简单的稀薄的, 弱相互作用下的玻色子原子气体, 但 20 年过去了, 尽管人们已使氢原子气体的相空间密度提高了 15 个量级, 但离 BEC 尚有距离。1980 年  $\text{Cu}_2\text{O}$  的激子被提出来作为第三个 BEC 候选者, 虽然 1993 年在实验中观察到了, 可同样由于复杂的相互作用, BEC 特性不能得到很好的研究。自从 80 年代中期, 碱金属原子的激光冷却和囚禁技术获得的巨大进展, 使人们可以以高密度和大数目产生超冷原子气体, 而冷却的碱金属原子被认为可以形成只有很弱相互作用的 BEC。1995 年, 美国科罗拉多大学的 JILA 小组, 莱斯大学小组, 麻省理工学院小组相继分别报道实验实现了  $^{87}\text{Rb}$  原子、 $^7\text{Li}$  原子、 $^{23}\text{Na}$  原子的 BEC。实现 BEC 的梦想终于在本世纪末完成了。

## 二、实现 BEC 的关键技术

如前所述, 实现 BEC 的关键是不断通过制

造超冷和超密原子气团来提高玻色气体的无量纲相空间密度。实现 BEC 的实验步骤一般是: (1) 初始获得大数目、高密度的超冷玻色原子气体; (2) 将样品装入静磁阱中; (3) 利用射频蒸发冷却技术进一步冷却原子气团; (4) 利用光学手段检测是否形成了 BEC。4 个步骤对应的 4 种重要实验技术是: (1) 激光冷却和囚禁技术; (2) 静磁阱技术; (3) 蒸发冷却技术; (4) 共振吸收成像技术。

### 1. 冷玻色原子气体的获得

实验上一般采用磁光阱捕获和初步冷却足够多的冷原子, 这一步既可以直接从室温下的高真空气室中冷却和捕陷(如 JILA 小组  $^{87}\text{Rb}$  的 BEC 实验), 也可以由碱金属原子束使用塞曼冷却器减速后装入阱中(如莱斯大学和麻省理工学院的小组); 然后撤掉磁场, 用光学粘团法进一步冷却原子样品, 从而获得高密度的超冷原子(约  $10^{10}$  个, 密度约  $10^{11} - 10^{12} \text{cm}^{-3}$ , 温度约  $10 \mu\text{K}$  量级)。

### 2. 静磁阱技术

许多中性原子具有磁偶极矩, 根据麦克斯韦电磁理论, 不均匀磁场  $B$  对磁偶极矩  $\mu$  有作用力  $F = -\nabla(\mu \cdot B)$ , 因而可以将原子囚禁在磁场的极小点处。最简单的静磁阱是反向亥姆霍兹线圈形成的四极阱, 其中心场强为零。反向亥姆霍兹线圈可以做得令囚禁力很强和囚禁时间很长。但由于它的中心场强为零, 其附近磁场方向变化剧烈, 所以原子经过中心零点时, 其自旋取向可能反转; 如果反转, 则势场零点反而成为势能最高点, 原子会逸出阱外。这是最大的缺陷。针对它, 人们想出了很多办法。例如:

#### (1) “TOP”阱(time orbiting potential)

这是 JILA 小组使用的。其原理是: 设轴对称的势形成了  $m = +1$  态的原子势阱(图 2 左), 最冷的原子将集中在零势点的附近。在这个区域,  $m = 0, \pm 1$  态的能级十分接近, 易发生“自旋跳变”。实验中增加了一个  $x-y$  平面内的转动磁场, 使零势点离开原点沿圆轨道运动(图 2 中)。旋转频率满足如下标准: 足够低, 使原

子自旋取向能缓慢地跟随所在点磁场的方向变化;但相对原子的空间运动来说,又足够高,以使原子在空间的运动“感受”到的只是一个无零势点的平均势(图2右)。这样加上横向旋转磁场后,使原有的四极势随时间在空间旋转,取时间平均后为一个椭球面简谐势阱,其最小点附近非零且变化平滑。这样大大减少了“自旋跳变”的可能性。

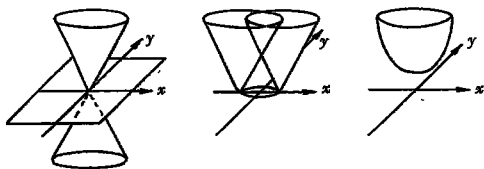


图2 “TOP”阱

### (2) “Ioffe”阱

这是 Rice 大学小组使用的静磁阱。它由  $x$ - $y$  方向放置的 4 个磁铁产生四极场,沿  $z$  方向放置的两个磁铁产生偶极场,在阱中心处磁场有最小值但不为零。因此它没有明显的“漏”孔。但它的问题在于永久磁铁组成的磁阱不易改变,也无法关断。

### (3) “光学塞孔”阱

由凯特勒领导的 MIT 小组设计了聚集于磁场零点的高斯光束,它会产生排斥势来堵“漏洞”。原子会受到排斥力而无法进入磁场零点附近(即激光强度最大的区域);同时,选择激光的频率远离钠原子的共振频率,避免了共振光子散射引起的加热效应。但“光学塞孔”阱中囚禁原子云位置和形状易受光学塞位置的影响。

### (4) “Cloverleaf”阱

这是凯特勒小组 Na 原子 BEC 实验的第二种静磁阱。用这种阱产生的处于 BEC 状态的原子数目比用“光学塞孔”阱提高了 10 倍。“Cloverleaf”阱利用分别被 4 个线圈环绕的 2 个轴向线圈,组成平面交叉结构,产生径向四极场,并附加 2 个大的轴向线圈以减小偏压场。这些线圈组成的阱允许独立和几乎正交地控制 3 个参量:轴向偏压场,轴向曲率和径向梯度。附加的大线圈产生  $x, y, z$  方向偏压场,允许光场

和磁场在阱中心精确交叠。

### 3. 蒸发冷却技术

这是把阱中的原子冷却至  $\mu\text{K}$  以下温度的关键技术。在磁阱中,能量较大的原子可以达到磁场较强的地方。在实验中选择一个适当频率的射频场,使较高能量的原子跃迁到非束缚态而逸出磁阱,剩下的原子通过弹性碰撞重新达到温度更低的热平衡。扫描射频场的频率使原子按能量由大到小逐次离开一部分,最后剩下的就是超冷的原子气体。蒸发冷却技术由于其基本思想与生活中通过蒸发冷却水相似而得名。这一技术的关键是极高的背景真空度和较大弹性碰撞截面,较高的原子密度。

### 4. BEC 的检测

目前 BEC 的形成多采用共振吸收成像技术来检测;基本过程是:突然撤去磁场,原子气团自由扩散,在不同的延迟时刻用共振的脉冲激光照射,用 CCD 阵列探测透射光成像,由于原子对共振光的吸收,在探测光中会产生阴影区。吸收的空间分布反映了原子飞行前的速度分布。

## 三、BEC 的重要应用——原子激光

BEC 最显著的应用,是“原子激光器”(atom laser,也译原子激射器)的出现。这是因为 BEC 是至今为止唯一可靠的方式能获得一个宏观数量布居在体系同一个量子态上的原子系统。原子激光器的概念和理论模型在 BEC 实验实现前后的 1995 年就提出了,而首次报道实现原子激光器则在 1997 年,由美国麻省理工学院的凯特勒小组完成(请注意,他们也在 1995 年成功地实现了  $^{23}\text{Na}$  的 BEC 实验)。这是一个振奋人心的消息,因为它是量子光学和超冷原子物理学研究的扩展交叉和发展,对于整个物理学和高技术领域的影响目前仍难以估计。

原子激光器实际上是“相干原子束发生器”(这正好类比于激光是“相干光波发生器”),即它发射的原子束具有高度相干的特性,束中所有的原子处于同一量子态上;同时,束中原子的能量处于单模,从能量分布角度讲具有极好的“单色性”;另外,由于发射出的原子均处于同一量子态

上,因此可以准直行进相当长的距离而无明显发散,即“指向性”好。从这三点看,与激光很相似,因此称为原子激光器。

实现原子激光器的第一步就是 BEC 的形成。如前所述, BEC 是宏观数量的粒子处于相同的最低量子态的玻色系统。虽然原子激光器原则上只要求原子处于同一量子态而不一定是基态,但到目前为止还没有其他可靠途径获得处于同一量子态的原子系统。但 BEC 系统不等同于原子激光器,原因在于 BEC 是一个处于极低温度下热平衡的系统,但原子激光器是一个开放系统。从 BEC 迈到原子激光器的关键是玻色凝聚体的输出耦合器。凯特勒小组通过在“Cloverleaf”阱中送入与 $^{23}\text{Na}$ 原子的一对超精细能级共振的射频脉冲实现,其过程是:(1)通过蒸发冷却技术使 Na 原子冷却到  $T_c$  以下,形成 BEC,这些原子都具有与磁场方向相反的磁矩;(2)送入射频共振脉冲,其效果可以看成使原子磁矩“倾斜”,实际上是部分原子经射频共振脉冲作用在超精细能级间发生了跃迁,由捕陷态变为磁矩相反了的非捕陷态,而离开磁阱;(3)相继送入几个这样的射频脉冲后,在重力作用下,这些相继离开磁阱的相干原子形成准连续的相干原子束。凯特勒小组还通过实验证实了输出原子束的相干性:通过在磁阱中心加一束  $\text{Ar}^+$  激光使发生凝聚的原子分成两段,然后关闭磁阱,让两段 BEC 的原子团自由膨胀同时沿重力方向自由下落,直到在相互重叠区用吸收成像法清楚地观测到高反射度的干涉条纹。这充分证实了形成 BEC 的原子具有很好

的相干性。进一步,他们将关断磁阱释放原子改为通过射频式输出耦合器输出原子,也看到了高反射度的干涉条纹。这证实了他们这样得到的原子脉冲也具有很好的相干性。

目前,原子激光器的研究还处于起步阶段。在理论方面,已有几种理论模型,但还没有较完善的原子激光器理论。另外,目前原子激光器只能在重力方向输出原子束,能否利用原子光学方法改变输出方向以至随意导引原子束,也是非常有意义的研究内容。在实验中,如何连续地输出脉冲相干原子束,减少相干原子束较明显的发散,提供其他非重力方向的输出,是原子激光器近期研究的主要工作。

原子激光器出现的意义是十分重大的。正像激光大大改进了光学实验一样,原子激光器可以大大改进原子物理学的实验,比如:它将提高原子钟的精确度,提高基本物理常数的测量精度,等等。原子激光还可能应用在纳米技术上,它将以极高的精确度将原子沉积在固体表面,即原子制版技术。但在所有意义里最重要的是,原子激光器的出现是开拓性的,它是第一种物质波的激光器。这已成为 20 世纪末的一个最重要的亮点。

除了应用于原子激光器,碱金属原子 BEC 的实验实现本身就是振奋人心的事情。此外,它的光学性质的研究也有着独特的意义。随着 BEC 的实现,超冷原子物理学必将迅猛发展。可以说, BEC 的实验实现打开了一扇通向新的未名领域的大门,将有什么更新奇和更深刻的东西出现,我们拭目以待。

## 《科海奇观》丛书简介

由河北少年儿童出版社最新出版的大型科普读物——《科海奇观》丛书,包括《瑰丽宇宙》(李启斌、赵复垣)、《微观新奇》(郑志鹏、江向东)、《探索生命》(陈秀兰)、《地球告急》(陈复、宋振海)、《材料新葩》(林鸿溢)、《蓝色星球》(肖承邨、陈民菊)、《挑战疾病》(胡大一、周鹏)、《交通纵横》(周日新)、《数字时代》(须德等)、《战神之箭》(焦国力等)十部作品。这十部作品均以

通俗易懂的语言、丰富翔实的资料和大量精美的图片分别从各个不同的角度准确地介绍了科学技术发展的最新思想和最新动态,以及在不同领域的应用,具有较高的科学价值。

欲购此套丛书者,请与该社(050071 石家庄市和平西路新文里 8 号)董素山副总编辑联系。需要《微观新奇》者,请汇 12.50 元(含邮资)由“现编部”代购。