

极端条件下原子系统的宏观量子效应

玻色—爱因斯坦凝聚

孙昌璞

中国科学院理论物理研究所,北京100080

众所周知,物质在微观尺度上表现出完全不同于经典运动的量子行为,而量子理论则成功地描述了这类诸如原子光谱和黑体辐射的非经典现象。根据量子理论的波粒二象性学说,实物微观粒子运动也会象光波水波一样,具有传播,干涉和衍射的波动行为,形成物质波(或称德布罗意波)。对于较小的或结构简单的粒子,如电子和中子,人们不仅在实验上已观察到干涉现象和衍射图样,而且基于这个原理,成功地制备了现代测量技术必不可少的电子显微镜和中子干涉仪。考虑到日常所见中的宏观物体是由大量服从量子力学规律的微观粒子组成的,人们自然要寻求在宏观尺度上最具量子特征的物理现象,如原子和分子集团的宏观量子效应。

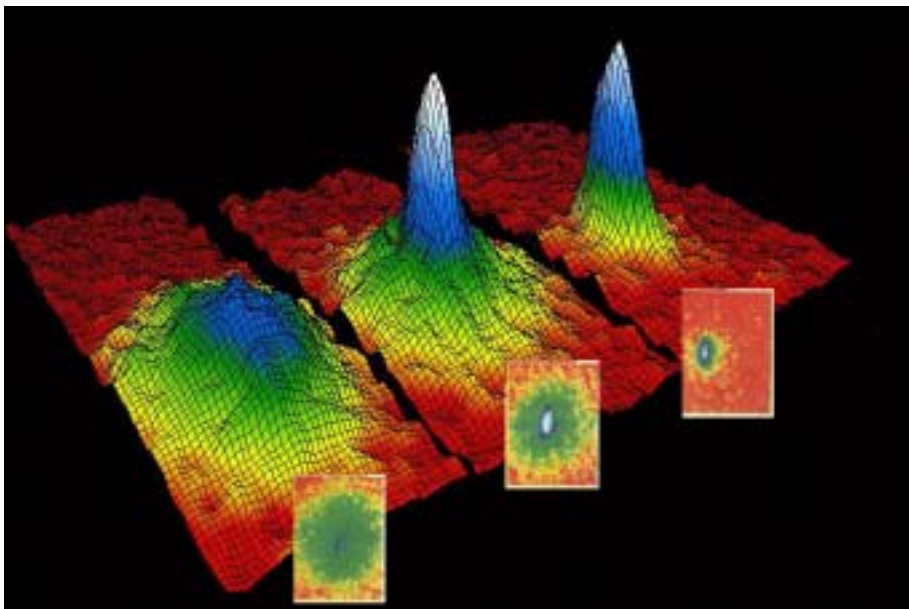


图1: 宏观量子态-BEC 产生的计算机处理图象:
Scientific American, 278-3 (1998) .

对于这种宏观量子效应的进一步研究,不仅可以加深人们对客观世界的进一步认识,而且也可能导致系列的革命性技术创新。大家知道,对于光波可以实现它的受激辐射相干放大-激光,那么,对于原子的物质波是

否也可以类似地做到这一点呢？这是一个非常自然而又十分基本的问题。但在没有实现原子系统的一种宏观量子态(图1)玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)以前，这只能是空想。物质波的波长太短了，在通常的情况下，原子波动的特征并不明显，只有在极冷的玻色-爱因斯坦凝聚状态，人们能很好地观察到原子的波动行为；只有在此基础上，人们才能考虑物质波的相干输出放大问题，才可以制备新一代物质波“光源”-“原子激光器”。

一．原子的宏观量子态--玻色-爱因斯坦凝聚

今天称之为玻色-爱因斯坦凝聚的物理现象是七十年前由爱因斯坦和玻色预言的宏观量子效应^[1-3]。1995年5月在美国科罗拉多大学和美国国家标准局的联合天体物理实验室(JILA)里首次被人们观测到^[4]。不久以后，Rice大学和MIT的研究小组相继报道了类似的发现^[5,6]。在1995年底，这个重要发现被国际合众社评为“十大国际科技新闻”。人们宣称，“终于得到了物质的第五种状态”宏观量子态。

事实上，组成自然界的粒子可分为两大类 玻色子和费米子。只有在极低的温度下，由它们组成的全同粒子体系才分别形成玻色-爱因斯坦凝聚和费米面填充、表现出各自明显的宏观量子特性。因此，去实现或发现玻色-爱因斯坦凝聚是人们认识客观物质世界基本构成的必然要求。1924年，通过著名物理学家爱因斯坦的德文翻译，30岁的印度物理教师玻色发表了今天称之为“玻色-爱因斯坦统计”的第一篇文章^[2]。接着，爱因斯坦从根本上完善和发展了这项工作，并大胆地提出了“凝聚”的观念^[1]：即当把玻色状态计数的思想应用到全同粒子组成的玻色型理想原子气体，在个临界温度以下，宏观数量的原子将突然凝聚到动量为零的单一量子态上，形成宏观量子态，其热力学特性（如比容和比热）将出现非解析和不连续的行为。对这种由“平凡”原子组成的无相互作用系统在宏观尺度上会出现“非平凡”的集体行为，人们一直困惑不解。直到五十年代中期，杨振宁和李政道的工作才使得这个问题得以最后澄清：这种非平凡性是在保持密度不变且体积和粒子数同时趋向无穷的热力学极限的结果^[7,8]。

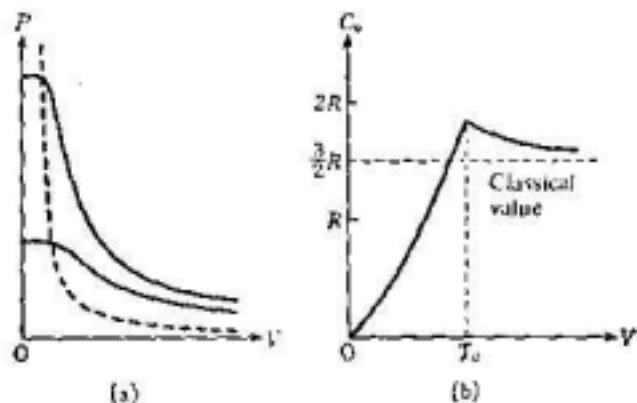


图 2： BEC 系统的热力学

从基本量子力学角度考察原子玻色-爱因斯坦凝聚问题,可以加深对这一重要物理观念本身的理解,并从中了解其实验发现过程的艰难和技术的关键所在。根据爱因斯坦的凝聚理论,只有当组成理想气体的原子热运动的物质波(热波)波长(相当于原子波包的平均宽度)与原子之间间距相比拟时,原子波包才能相干地重叠起来,形成一种相干的宏观量子态-物质的第五态。在这种状态下,个体原子不能独立存在,只有众多原子的集体协同行为或宏观特性才是重要的。

然而,来自真空或其它环境的自然界“噪音”无时无刻不在扰动原子的运动,它使得大量原子同时凝结在单一的量子态上十分困难。只有把系统冷却到尽可能低的温度,才有可能形成宏观量子态。事实上,由于原子的热波波长与温度和原子质量的平方根成反比,而原子质量很大,在室温下热波波长很短,与原子的间距相差几个数量级。如果要在实验室中实现原子的玻色-爱因斯坦凝聚,必须把原子温度冷却到 μk 的数量级,这在没有发明激光冷却原子新技术以前几乎是不可能的。

虽然人们相信超导和超流也是玻色-爱因斯坦凝聚的体现,但这类强关联系统毕竟与当年玻色和爱因斯坦的预言相差甚远^[9,10]。由于存在复杂的相互作用,人们不清楚这类凝聚是相互作用造成的,还是由于全同粒子的玻色-爱因斯坦统计引起的,只有后者才能充分体现宏观量子现象的根本特征。因而,几代物理学家一直努力寻求在无相互作用或仅有排斥弱作用的稀薄原子气体中发现这一重要物理现象。早期人们曾经试图用极化氢等^[11]实现玻色-爱因斯坦凝聚,由于氢原子相关制备测量系统的技术困难,这方面实验工作开展的相当困难,直到1998年8月,Kleppner领导的MIT另一个研究小组才取得实质性的进展^[28]。

二 . 激光冷却和超冷原子制备

实现原子系统的玻色-爱因斯坦凝聚的关键技术是原子激光冷却，它是八十年代中期后发展起来的。这一重要技术早期发展的动机并非以实现原子玻色-爱因斯坦凝聚为目标。当时的主要目的是为了精确测量各种原子参数，实现高分辨激光光谱和超高精度的量子频标（原子钟）。为此，人们希望获得几乎处于静止状态，无复杂相互作用的原子体系。若用一般的冷却办法，原子会在低温下凝结在容器壁上而不再孤立存在，只有激光冷却和原子阱技术才能巧妙地使原子极限地减速。由于发展了原子玻色-爱因斯坦凝聚实验中的关键技术——激光冷却，斯坦福大学华裔物理学家朱棣文（Steven.Chu），美国国家标准局的 Phillips 和法国巴黎高等师范学校 Cohen-Tannoudji 于 1997 年底获得物理学诺贝尔奖。

本世纪初，人们就注意到光对原子有辐射压力作用，但这个压力太微弱，不足以使原子明显地改变速度。激光器发明后的若干年（1975 年），Hänsch 和 Shawlow 等提出了共振激光减速原子的建议^[12]。在此以前，前苏联的 Letohov 等人也于 1968 年发现了共振散射的偶极力可以把原子捕获在光束之中^[13]。然而，技术上真正的突破是 1985 年在贝尔实验室工作的华裔物理学家朱棣文（S.Chu）等人的工作^[14]。他们发现，当原子在频率略低于原子跃迁能级差且相对传播的一对激光束中运动时，由于多普勒效应，原子倾向于吸收与原子运动方向相反的光子，而对相同方向的光子吸收几率较小；吸收后的光子将各向同性地自发辐射。平均地看来，两束激光的净作用是产生一个与原子运动方向相反的阻尼力，从而使原子的运动

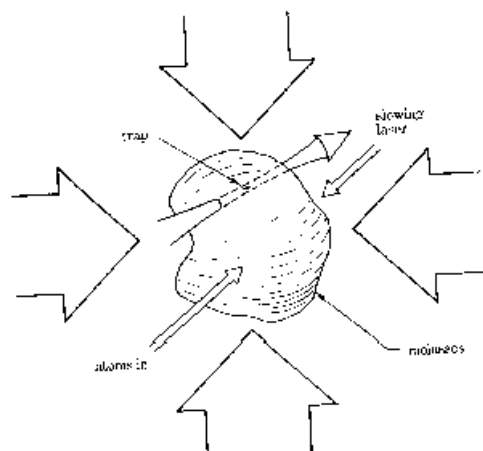


图 2：“光学粘团”

冷却下来。在三个互相垂直的方向安置三对相对传播的激光束，则形成所谓的“光学粘团”^[15]，它可以使原子在三维方向上得到冷却（图3）。通过这种技术，朱棣文等首次把钠原子冷却到了 $240\mu\text{k}$ 。然而，吸收光子以后，原子速度降了下来；由于这时偏离了共振条件，进一步吸收反向光子的可能性变小了。为了补偿这种效应，美国国家标准局的 Phillips 等人提出用非均匀磁场产生的能级非均匀塞曼劈裂来增强共振吸收^[16]。由此，Dalibard 和 Pritchard 发展了磁场和光结合的冷却技术^[17]。法国巴黎高等师范学校 Cohen-Tannoudji 研究小组和朱棣文等人在此基础上提出了更精巧的冷却方案^[18,19]，可以把氦原子在一个方向冷却到 $1\mu\text{k}$ 。Cohen-Tannoudji 本人是位理论物理学家，他在原子激光冷却理论方面作出了特殊的贡献^[20]。需要指出的是，中国科学院上海光机所的王育竹小组 70 年代末在中国率先开展原子激光冷却的研究，在 1988 年，实现了钠原子 $60\mu\text{k}$ 的一维冷却。

上述原子冷却技术虽然能克服诸如多谱勒冷却极限等某些困难，但由于在磁场零点原子出现能级交叉，交叉点上的低速原子将跳到一个非共振的高能级上，并从磁-光原子阱中逃逸出来。即使在纯磁场约束的原子阱中，磁场零点的非绝热逃逸仍是一个困难问题。后来实现原子玻色-爱因斯坦凝聚的关键，均是去克服能级交叉点上原子逃逸的困难。

三．实现原子玻色-爱因斯坦凝聚

为了把原子进一步冷却，达到玻色-爱因斯坦凝聚的温度，Weiman 领导的 JILA 小组中的 Cornell 等人与德国的 Pitrich 合作在 1995 年初提出了“时间平均轨道势”的重要方法^[21]：他们通过附加一个时变的射频磁场，使得磁场零点不再固定不变，而是绕着原来的零点在平面内快速转动。这相当于形成一个底部较快转动的原子磁阱，当原子以较慢的速度去接近阱底时，将会永远也达不到势能零点。这个物理过程的时间平均结果，相当于原子经历一个不再有能级交叉的有效势。对应于不同磁量子数的塞曼能级在交叉点的简并被解除了，原子不再从势阱的约束能级跳到一个相当于势垒的非约束能级上去，超低速原子在能级交叉点上的逃逸问题从此得到解决。文章发表两个月以后^[4]，Weiman 小组又进一步把“时间平均轨道势方法”与蒸发冷却技术^[22]结合起来，成功地把铷原子气体冷却到 $0.17\mu\text{k}$ 。值得指出，蒸发冷却的技术是以前研究极化氢相关问题时发展起来的另一种冷却原子技术，其关键是利用射频趋动把处在

较高能级的“高能原子”从有限高度边缘的磁阱中蒸发掉。循环利用这种方法可以增大处于基态上原子的浓度。由于 $0.17 \mu\text{K}$ 恰好相当于在密度为 $2.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 时铷原子玻色-爱因斯坦凝聚的温度, Weiman 小组首次实现了弱作用稀薄铷原子气体的玻色-爱因斯坦凝聚。

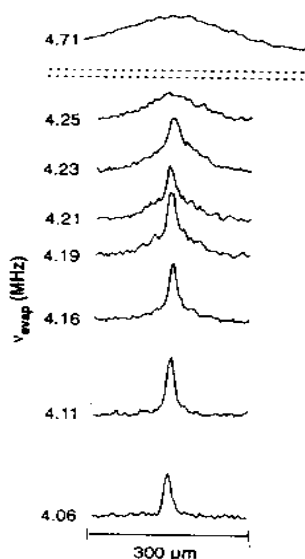


图 4： BEC 原子扩散速度分布：
Science 269(1995),200

为了在实验中确定是否发生了玻色-爱因斯坦凝聚，完成冷却后他们迅速关掉约束磁场，通过测量飞行原子的扩散空间位形，确定其速度分布，明显地观测到了出现玻色-爱因斯坦凝聚的基本特征：在较宽的麦克斯韦速率分布本底上出现一个在零速度附近的尖峰，而且随着温度的均匀下降，这个低速尖峰中的原子数会突然增加，与没有凝聚的部分各向同性热运动速度分布相比，除了磁阱的量子基态，尖峰显示了各向异性的行为（图 4）。这些特征充分展示了人们确实发现了物质的第五态-原子的玻色-爱因斯坦凝聚。

一个月以后，美国 Rice 大学 Hulet 领导小组也发表文章宣称在锂原子系统观察到了玻色-爱因斯坦凝聚^[5]。但由于锂原子在特定的实验条件下存在吸引的有效相互作用，人们无法区分凝聚产生的原因是否是量子统计的结果^[5]。因此，对 Rice 大学的实验，人们存疑至今。不过，两个月以后，麻省理工学院 Ketterle 领导小组利用“光塞”方法（图 5），对钠原子系统得到更确定的结果。他们的冷却温度虽然只有 $2 \mu\text{K}$ ，但原子密度超过了 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ^[6]。这个工作为 Ketterle 小组以后研究玻色爱因斯坦-凝聚原子的相干输出-“原子激光”打下了必要的基础^[24-27]。

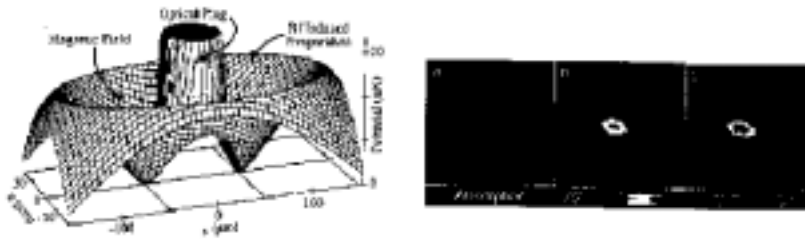


图 5 : MIT 的 BEC 实验 : Phys.Rev.Lett.75(1995)397

四 . 凝聚原子的宏观量子现象和 “ 原子激光 ”

实现原子系统的玻色-爱因斯坦凝聚以后,这个领域的研究工作自然将会向两个方面发展。一方面人们需要考虑它能否对高新技术产生影响,如实现稳定的物质波相干放大输出,得到比普通光波和电子波波长更短的“光源”-原子物质波激光器;另一方面,更加关注基础理论和基本实验方面的问题,如玻色-爱因斯坦凝聚的形成过程(图6)^[27],玻色-爱因斯坦凝聚原子的量子隧道效应^[25]和存在原子间相互作用时的宏观量子行为-低温碰撞导致原子-分子转换的 Feshbach 效应^[26]。为了直接表现玻色-爱因斯坦凝聚原子

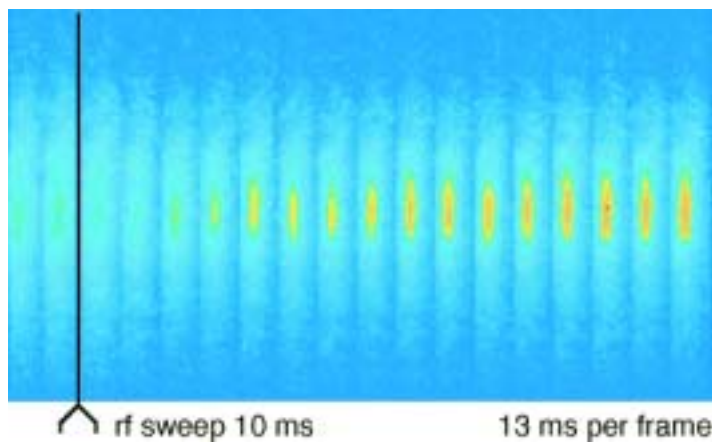


图 6 : BEC 的形成过程 : Science, 297(1998),1005

的宏观量子效应 ,Yale 大学的 Anderson 和 Kassevich 最近成功地完成了驻波场中的玻色-爱因斯坦凝聚体在波节间的量子隧道效应实验^[25],它呈现出类似于超导电子系统的直流 Josephson 效应的宏观量子干涉现象(图7)。

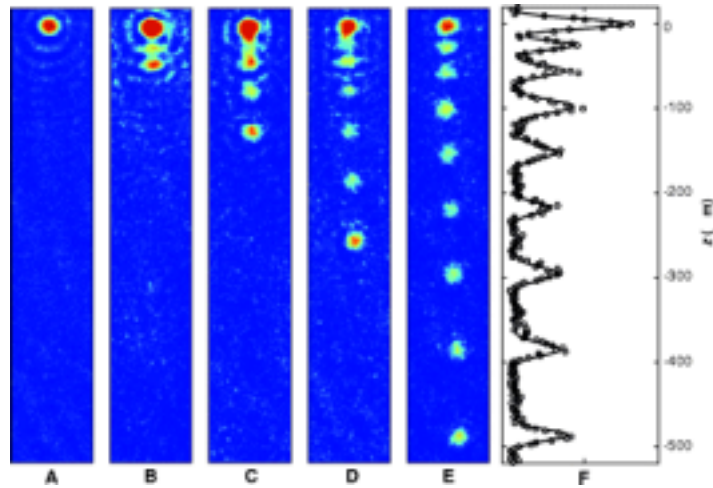


图 7 : BEC 的 Josephson 宏观干涉现象: Science,282(1998),1686

在原子玻色-爱因斯坦凝聚实验发现的前前后后，许多理论物理学家和实验工作者开始考虑怎样由原子玻色-爱因斯坦凝聚产生原子激光的问题，他们提出了各种理论框架和实验方案，但最终还是 Ketterle 小组在 1996 年底和 1997 年首先在实验上取得了实质性进展^[23]。通过相干的射频光场把磁阱中处于玻色-爱因斯坦凝聚状态的原子激发到磁量子数为 0 或其它没有约束的塞曼能级上，他们发现原子会经历一个相当理想的集体 Rabi 振荡。通过射频扫描的办法，可以得到一个保持原子相干性的稳态输出。这

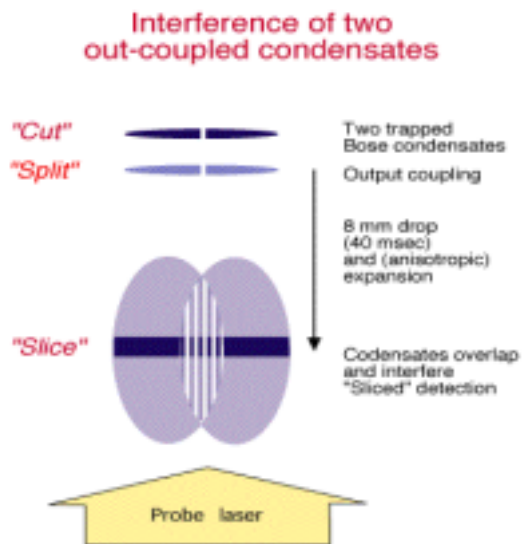


图 8 :“原子激光”示意图

些没有约束的相干原子会在重力场中自由下落并扩散(图 8)。当初

态玻色-爱因斯坦凝聚原子制备在一个双阱势而不是单阱势中，激发出两团原子下落时会相干地重叠起来，产生很明显的相干条纹^[24]（图9）这表明，人们的确得到相干性很好的原子束-“原子激光”。事实上，由于实物粒子质量非零，在垂直于传播方向上原

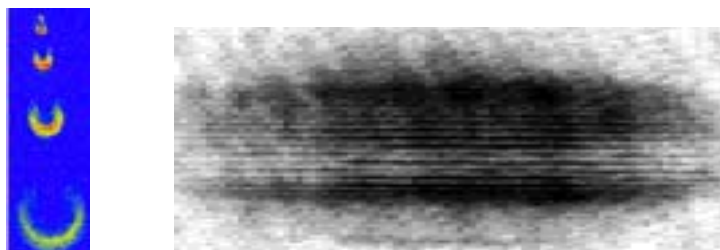


图9：“原子激光”形成与干涉: Nature, 385(1997),685

子束必将扩散，使原子束变宽。因而，物质波的相干输出通常并不具有很好的方向性，它只是在相干性方面保持激光的特性^[27,28]。因而，Ketterle 小组在宣布他们这一重要工作时，谨慎地称：这种相干输出“可以当做脉冲的原子激光”。需要指出的是，原子激光至今还没有一个大家达成共识的明确定义。但毋庸置疑，Ketterle 小组的开创性工作已表明，最终实现稳定的物质波相干放大输出是完全可能的。这个工作一旦成功，人们便可以得到比光波和电子波波长更短的“光源”——原子物质波激光器。原子激光一旦实现，它不仅可以为物理学家提供进一步探索物质世界微观领域更有效的“利器”，而且有可能像光波激光器一样在工业中得以应用，导致一场深刻的新技术革命。

五：宏观量子行为的动力学控制

关于玻色-爱因斯坦凝聚气体中原子低温碰撞的研究，导致了原子-分子转换的 Feshbach 共振效应^[26]的实验发现。这个效应是六十年代 Feshbach 在研究强外场中原子核碰撞时发现。外磁场中超冷原子碰撞散射过程将根据不同的超精细结构状态分为开道和闭道，外磁场使得开道的渐近态的能量低于闭道。因此，当磁场取特定强度时，从开道入射的原子会与闭道中的束缚态发生共振，两个原子“粘”在一起，先形成具有一定寿命的分子，然后分开。这个共振过程会导致散射长度的突然改变。通过调节磁场，可以使有效散射长度从正变到负（图10）。由于散射长度标志着原子间的相互作用强度，从而决定了玻色-爱因斯坦凝聚气体原子的宏观量子行为，如玻色-爱因斯坦凝聚气体的集体振荡的约化。

事实上，散射长度为零意味着人们通过调节外场得到了没有相

相互作用的理想玻色原子气体；散射长度为负意味着我们可以观察凝聚体的突然塌陷。由此可见，玻色-爱因斯坦凝聚 Feshbach 效应^[26] 的实现，表明了人们不仅能够通过外场调节微观层次上原子原子间相互作用，而且能有效地控制“物质的第五种状态”——宏观量子态。

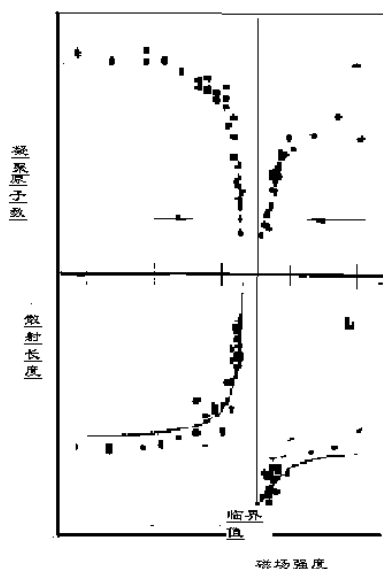


图 10： Feshbach 共振：Nature，392 (1998)，151

六：超冷原子的微腔量子电动力学和原子光学

上述玻色-爱因斯坦凝聚实验和相关的原子冷却囚禁技术的发展，会进一步促进原子物质波量子干涉效应--原子光学的研究。所谓的原子光学，是研究光场中原子束由于与光子交换能量-动量所导致的类光行为^[29]，如原子束的分束与聚焦。由于与光子的动量相比，通常原子质心运动的动量很大，吸收和发出光子时原子质心运动不会发生宏观的改变。只有对于超冷原子（如温度为 μK ，Cr 原子的速度为每秒几个厘米），光子的动量才能与原子质心运动的动量相比拟。这时，当原子束开始沿垂直于驻波波矢方向在电磁场中入射，原子将吸收垂直于其初始运动方向的光量子而偏转（图11）。由于沿垂直于驻波波矢方向吸收的光子动量是量子化的，原子束将对称分裂，形成周期花样。将特定的分束原子相干地沉积在硅化物衬底上，形成周期性的纳米结构，这是原子相干研究和介观物理交叉领域的结合点。

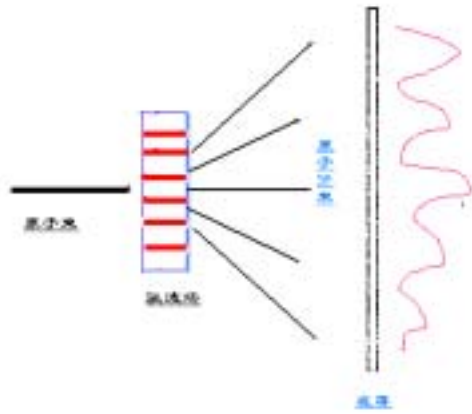


图11： 原子光学示例

原子光学的研究是腔体量子电动力学^[29]的一个重要发展，它除了象传统的量子光学一样强调光场的相干性，主要着眼于特殊条件下相干原子集团和光场的相互作用。在超小尺度（与原子辐射波长可比拟）腔体量子电动力学中，固定腔壁为辐射场提供的边界条件，可以通过原子的集体相干效应，增强或抑制原子的自发辐射。这涉及到光与物质的强场作用，微扰论通常不再适用，从而需要发展传统的量子电动力学，正确描述原子质心运动相关多普勒效应、反弹现象和多能级高激发态原子与单模(少模)腔体光场的作用。由此有可能建立激光致冷的新机制。例如，在超短波微腔中，超冷原子的运动，满足绝热近似的条件，处在不同内部状态的原子将与特定的光场态纠缠，形成不同的绝热缀饰态，经历不同的有效作用势。由于这个机制，对应于不同的

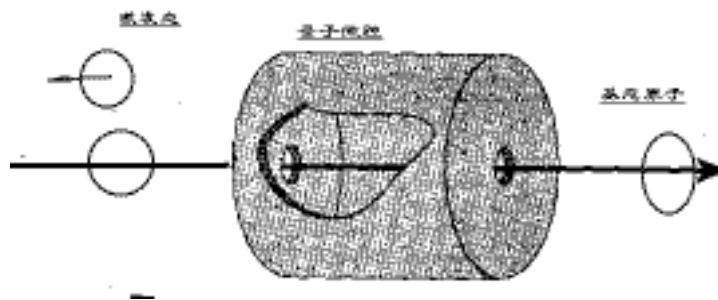


图12：冷原子探测真空效应

失谐情况即使腔中没有光子，真空微腔也可能排斥激发态（或基态）的超冷原子，吸引态基（或激发态）的超冷原子（图12）。这个事实进一步雄辩地证明现代物理的“真空不空”这一深刻的物质观！不同光子态也将导致处在同一单态原子束空间分裂的宏观量子动力学行为，如原子的多光子逆斯特恩-盖拉赫分束问题等（图12）。这些现象的出现，从与光场相互作用的角度，体现了原子物质波相干效应的丰富多彩。

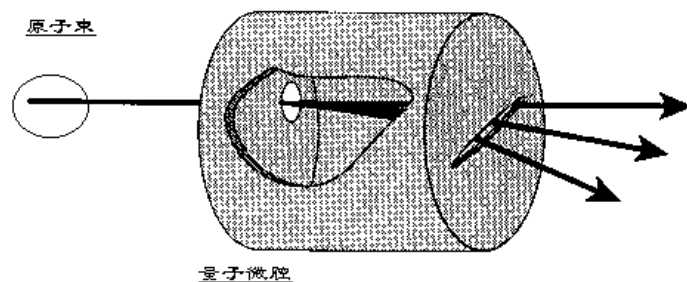


图13：逆斯特恩-盖拉赫分束

七：科学前景

本文所描述的原子玻色-爱因斯坦凝聚相关的宏观量子态实验和理论研究，目前已成为现代物理学的重要前沿领域。在现代高技术所提供的极端物理条件的背景下，与本世纪初期物理学的重要物理思想遥相呼应，纵横发展，绵绵不息，展现了物理科学发展的活力与生机。

能够在单一的量子态上制备具有复杂内部结构的宏观布居的原子，并对其微观和宏观动力学行为进行有效的控制。这不仅会导致重要物理现象的批量产生，而且促进我们对物理学某些重要基本问题的重新认识。大家知道，目前关于原子玻色-爱因斯坦凝聚的可靠的结果只是关于奇异密度分布的测量，对其它的量子统计性质（如比热，相变曲线，超流特性）、光谱特征和形成玻色-爱因斯坦凝聚的动力学过程未有深入的微观研究。从微观模型出发，着眼于这约束势中原子的玻色-爱因斯坦凝聚微观动力学过程，是一个有相当难度又十分重要的基本问题。对于非理想的高密原子气体，分析外场的有效势对相变温度的影响和有限粒子情况下的玻色-爱因斯坦相变条件，是一个实验正在面临但理论上尚未彻底解决的课题。从基本理论上讲，这些研究必将涉及到基本概念的深入理解和新理论的建立。例如，在激光冷却原子过程中，温度由有限个原子平均速度决定，是一个随时间改变的动力学变量。它与纯统计意义下温度的定义有微妙的差别，只是在准平衡意义下才适用。因而，需要建立一个依赖于时间、描述从一个准平衡态到另一个准平衡态过渡、不同于传统非平衡态统计的动力学相变理论。

虽然实验已表明通过原子玻色-爱因斯坦凝聚机制可以实现原子束的相干放大-“原子激光”，但由于原子有质量不同于光子，光速

不变性使“原子激光”本质上区别于光子激光，故至今尚未有一个为大家普遍接受“原子激光”的定义。另外，原子是有结构的，玻色型原子本质上由费米子组成，在强碰撞时，单一的复合玻色自由度已不能完整地描述原子系统的全部动力学，必须有相应的理论和实验去描述残余费米子自由度的影响。相应的原子光学问题在玻色-爱因斯坦凝聚发生时，也会呈现出极其丰富的相干物理结构。

总而言之，近年来原子玻色-爱因斯坦凝聚相关的物质波的实验和理论研究，深入地揭示了科学和技术发展的内在互动关系。虽然科学的直接目的是认识世界，对科学真理的追求通常也是非功利的，但它却可以导致了一系列的高新技术变革，深刻地影响人类的社会生活。的确，本世纪以量子力学为代表的基本物理学理论确实导致了一系列新技术的产生，如激光的发明和半导体的应用，已深入到我们的物质生活各个领域。高新技术的发展又反过来为进一步认识客观世界提供了更有效的试验手段，使得人们能够在前人无法实现的极端特殊条件下探索物质世界的结构和自然规律。在这些情况下出现的新的物理现象，要求发展新的物理理论，可能形成科学研究新的分支，如目前关于玻色-爱因斯坦凝聚、原子激光和微腔量子电动力学的研究。毫无疑问，这些新兴研究分支中的基本问题不仅已经成为国际科学研究的前沿，而且有着相当重要的应用前景和发展潜力。

参考文献

1. A. Einstein, *Sitzungsber. Kgl. Preuss. Akad.* **1924**, 261(1924)
2. S. N. Bose, *Z. Physik*, **26**, 181(1924)
3. A. Einstein, *Sitzungsber. Kgl. Preuss. Akad.* **1925**, 3(1925)
4. M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman and E. A. Cornell, *Science*, **269**, 198(1995).
5. C. C. Bradley, C. A. Sackett, J. J. Tollett and R. G. Hulet, *Phys. Rev. Lett.*, **75**, 1687(1995).
6. K. B. Davis, M. O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn and W. Ketterle, *Phys. Rev. Lett.*, **75**, 3996(1995).
7. C. N. Yang and T. D. Lee, *Phys. Rev.* **87**, 404(1952)
8. T. D. Lee and C. N. Yang *Phys. Rev.* **87**, 410(1952)
9. A. Griffin, D. W. Snoke and S. Stringari (ed.), *Bose-Einstein Condensation*, Cambridge Univ. Press., 1995
10. K. Huang, *Statistical Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, 1987
11. I. F. Silvera and J. T. M. Walraven, *Phys. Rev. Lett.*, **36**, 910(1980).
12. T. Hansch and A. Schawlow, *Opt. Commun.*, **13**, 68(1975)
13. V. S. Letokhov, *JETP Lett.* **7**, 272(1968).
14. S. Chu, *Laser Cooling and Manipulation of atoms, and Selected Applications*, in *Laser manipulation of Atoms and Ions*, ed. By E. Arimondo, W. D. Phillips and F. Strumia, North-Holland, 1992, 239
15. S. Chu, J. E. Bjorkholm, A. Ashkin and A. Cable, *Phys. Rev. Lett.*, **57**, 314(1986).
16. W. D. Phillips and H. Metcalf, *Phys. Rev. Lett.*, **48**, 596(1982).
17. J. Dalibard, *Laboratoire de Spectroscopie, Université Paris VI, Previews communication. 1986*
18. E. Raab, M. Prentiss, A. Cable, S. Chu and D. Pritchard, *Phys. Rev. Lett.*, **59**, 2631(1987).
19. A. Aspect, J. Dalibard, A. Heidmann, C. Salomon and C. Cohen-Tannoudji, *Phys. Rev. Lett.*, **61**, 826(1987).
20. C. Cohen-Tannoudji, J. Dupont-Roc and G. Grynberg, *Atom-Photon Interactions*, John Wiley & Sons, New York, 1992
21. W. Perich, M. H. Anderson, J. R. Ensher and E. A. Cornell, *Phys. Rev. Lett.*, **74**, 3352(1995).
22. C. Monroe, E. Cornell, C. Sackett, C. Myatt, and C. Wieman, *Phys. Rev. Lett.*, **70**, 414(1993).
23. M. -O. Mewes, M. R. Andrews, D. S. Durfee, D. M. Kurn, C. G. Townsend and W. Ketterle, *Phys. Rev. Lett.*, **78**, 582(1997).
24. M. R. Andrews, C. G. Townsend, H. J. Miesner, D. S. Durfee, D. M. Kurn and W. Ketterle, *Science*, **275**, 637(1997).
25. B. Anderson and M. Kasevich, *Science*, **282**(1998), 1686

26. S. Inouye , M. Andrews , H. Miesner, D. Stamper-Kurn , and W.Kitterle, Nature , 392 (1998) , 151
27. H.Miesner, D. Stamper-Kurn,M. Andrews, D. Durfee,S.Inouye and W.Kitterle , Science, 279 (1998), 1005.
- 28.D.Kleppner,T.Greytak,T.Killian,D.Fried,L.Willmann,D.Landhuis, S.Moss, Proceeding of International School of Physics " Enrico Fermi", Course 140,Dec.,1998; Lanl e-print,physics/9809017
- 29.P.Berman, ed.,Cavity Quantum Electrodynamics, Academic Press, INC.New York,1995

关于原子激光冷却有大量综述文章，其中部分中文文章有

- 30.王义遒，物理 19(1990),389;449; 27(1998),131
- 31.王育竹，王笑鹃，物理, 22(1992), 16

关于玻色爱因斯坦凝的中文综述有

- 32.郝柏林，物理学进展，1997
- 33.孙昌璞，科学发展报告，科学出版社,1998，P52.
- 34.王晓辉,李义民, 王义遒,物理, 27(1998),3.
- 35.李师群,周义东,黄湖, 物理, 27(1998),12