

玻色 - 爱因斯坦凝聚研究的 过去与未来

熊 炜 陈徐宗

1. 玻色 - 爱因斯坦凝聚的来由

2001年,瑞典皇家科学院宣布2001年诺贝尔物理学奖分别授予美国科学家埃里克·康奈尔(Eric Cornell)、德国科学家沃尔夫冈·克特勒(Wolfgang Ketterle),以及美国科学家卡尔·韦曼(Carl Wieman)。

三位科学家获得当年诺贝尔物理学奖的理由是实现了稀薄气体中的碱性原子的玻色 - 爱因斯坦凝聚,揭示了一种新的物质状态——玻色 - 爱因斯坦凝聚态(BEC)。众所周知,激光与普通灯光不同之处在于,在激光中所有光子都具有相同的能量与振荡,而如何控制其他粒子达到同样的状态一直就是对物理学家的挑战。

2001年的诺贝尔物理学奖得主成功地解决了这一问题,他们使得原子能够“同步地歌唱”,这样就得到了一种新的物质状态——玻色 - 爱因斯坦凝聚。这种物质状态缘起于1924年,那一年印度物理学家玻色(Satyendra Nath Bose)提出了一个不可分辨的多个全同粒子的新观念,使得每个光子的能量满足爱因斯坦的光量子假设,也满足玻尔兹曼的最大机率分布统计假设,这个光子理想气体的观点可以说是彻底解决了普朗克黑体辐射的

半经验公式的问题。可能是当初玻色的论文因为没有新结果,遭到退稿的命运。他随后将论文寄给爱因斯坦,爱因斯坦意识到玻色工作的重要性,于是把这篇文章翻译成德文发表,并立即着手这一问题的研究。爱因斯坦于1924和1925年发表两篇文章,将玻色对光子(粒子数不守恒)的统计方法推广到原子(玻色子,粒子数守恒),预言当这类原子的温度足够低时,所有的原子会突然聚集在一种尽可能低的能量状态,从而发生相变,产生一种新的物质状态,这种过程与从气体中滴下一滴液体相似。这种状态被命名为玻色 - 爱因斯坦凝聚态,以纪念两位科学家在此方面开拓性的工作。

玻色 - 爱因斯坦凝聚态不仅仅是科学家天才的思想中闪现出来理论模型,而是和自然界中很多其他的物理现象有着千丝万缕的联系。1938年物理学家伦敦(Fritz London)提出玻色 - 爱因斯坦凝聚是氦4(^4He)的超流现象以及超导现象的内在机制。随着超导现象研究不断深入,科学家对于玻色 - 爱因斯坦凝聚的研究热情也不断地升温,并在理论上有了长足的进展,但是在实验上由于凝聚态的实现需要非常低的温度,在当时的实验条

件下无法实现,因此在玻色 - 爱因斯坦凝聚的概念提出后的几十年时间中,实验上一直没有有什么进展。

随着时间的推移,科学和技术在不断地发展和前进。玻色 - 爱因斯坦凝聚的实验实现也逐渐出现了转机。1953年出现吸气剂泵和离子泵为超高真空的获得提供了条件。超高真空环境对于凝聚体的实现是非常必要的。首先,真空中背景气体分子的密度要足够小,只有这样才能保证在获得凝聚体的过程中,环境对低温的原子气体的碰撞足够少,不会使得原子气体的温度升高得过快而破坏了冷却的效果;其次,超高真空中稀薄的背景气体也保证了在获得了凝聚体后,背景气体的碰撞对凝聚体的加热足够慢,这样我们有足够长的时间来观测所获得的凝聚体。从20世纪50年代到70年代之间,高速加速器、等离子体核聚变装置、超大规模集成电路,特别是航空航天技术推动了真空技术高速发展。现在人类能够获得和测量的极限真空压强从20世纪50年代的 10^{-5}Pa 下降到了 10^{-13}Pa 。我们实现玻色 - 爱因斯坦凝聚态所需要的真空压强一般不能高于 10^{-8}Pa ,条件已经具备了。

另一个与实现凝聚体相关

的技术飞跃是激光器的发明。从1960年第一台红宝石激光器开始，科学工作者发明了多种多样的激光器，这些激光器包含固体激光器、气体激光器、半导体激光器、染料激光器、自由电子激光器等，这些激光器覆盖的波长范围不断地扩展，它们能达到的最大功率也不断增加，同时各种压缩激光线宽和稳定激光频率的技术也不断地发展，这为我们使用激光精密操控原子提供了手段。

1968年苏联科学家莱托霍夫(V. S. Letokhov)提出利用激光场来囚禁中性原子的建议。1970年美国贝尔实验室的科学家阿斯金(A. Ashkin)提出利用激光的压力偏转原子束；紧接着，1975年美国斯坦福大学的汉斯(T. W. Haensch)和肖洛(A. L. Schawlow)提出利用激光来冷却中性原子。他们的基本思想是让运动原子吸收其迎面射来的激光束中的光子，由于原子运动产生的多普勒效应，使其吸收比原子跃迁中心频率低的光子，随后原子又发射出和其中心跃迁频率相同的光子，这样运动原子吸收频率偏低的光子，放出频率偏高的光子。这一过程遵循能量守恒，原子必须减少动能以补充放出光子的能量。由于吸收和放出光子的过程可以在 10^{-8} 秒内完成，这样过程不断重复，原子可以在很短时间内通过激光冷却将自己的动能降为零。因此，激光冷却是一种冷却效率极高的方法。苏联科学院光谱所的巴列金(V. E. Balykin)与莱托霍夫(V. S.

Letokhov)和美国国家标准技术研究院(NIST)的菲利普斯(W. D. Phillips)分别于1980年在实验上冷却了钠原子束。紧接着菲利普斯和当时在美国贝尔实验室阿斯金小组的朱棣文与法国巴黎高等师范学院(下文简称巴黎高师)的科恩-塔努基(Cohen-Tannoudji)发展了一系列激光冷却的新方法，他们可以将冷原子冷却到当时理论预言的极限温度以下，1985年，他们得到了极低温度(24 μ K)的钠原子气体。随后进一步用三维激光束形成磁光阱将原子囚禁在一个小区域中再加以冷却，获得了更低温度的“光学粘胶”。之后，许多激光冷却的新方法不断涌现，其中较著名的有“速度选择相干布居囚禁”和“拉曼冷却”，前者由科恩-塔努基提出，后者由朱棣文提出，他们利用这种技术分别获得了低于光子反冲极限的极低温度。此后，人们还发展了磁场和激光相结合的一系列冷却技术，其中包括偏振梯度冷却、磁感应冷却等。朱棣文、科恩-塔努基和菲利普斯3人也因此而获得了1997年诺贝尔物理学奖。

至此，在实验上获得玻色-爱因斯坦凝聚的障碍基本上都被扫清了。但是离实现玻色-爱因斯坦凝聚(相空间密度大于1以上)还有很大的差距，相空间密度需要提高6个数量级，因此需要进一步冷却原子温度，提高原子密度(在常用碱金属原子的密度为 $10^{14}/\text{cm}^3$ 的条件下，其相变温度一般在500 nK左右)，激光冷却已经无能为力，从MIT小组毕业并在科罗拉多大

学与美国标准局联合天体物理实验室(JILA)工作的教授韦曼和博士后康奈尔以及MIT小组的德国博士后克特勒，采用了MIT小组教授科来普奈(Danie Kleppner)在冷却氢原子气体采用的蒸发冷却方法，分别在铷原子与钠原子稀薄气体中实现了玻色-爱因斯坦凝聚，2001年韦曼、康奈尔以及克特勒3人获得了诺贝尔物理学奖，平分了1000万瑞典克朗的奖金。

正如瑞典皇家科学院发表的新闻公报所说，分享2001年诺贝尔物理学奖的3名科学家的成功发现，犹如是找到了让原子“齐声歌唱”的途径，这种控制物质的新途径必将给精密测量和纳米技术等领域带来“革命性”的变化。瑞典皇家科学院的颁奖书说：“他们共同发现的玻色-爱因斯坦凝聚将在精确测量和纳米技术这样的领域带来革命性的用途，将在平版印刷、纳米技术和全息摄影等领域得到革命性的应用。”

2. 玻色-爱因斯坦凝聚是什么

玻色-爱因斯坦凝聚态，与固态、液态和气态类似，是一种物质的状态。这种物质的状态只能存在于粒子为玻色子的情况下。对于玻色子，大量粒子能够处于同一状态中，玻色子满足玻色-爱因斯坦分布；相对的是费米子，同一状态中的粒子数不能大于1，费米子满足费米-狄拉克分布。就原子而言，只要其总的自旋量子数为整数，就是玻色子。对于经典的原子气体，由于其温度较凝聚体而言更高，它们动量的不确定度高，物质波波长

很短，同时由于气体很稀薄，原子间的平均距离较长，所以气体中的原子表现出经典粒子的特点，每个原子都是一个独立的刚性小球，互相碰撞，并表现出各自不同的运动特征，且都需要用一个单独的波函数描述。

当气体的温度降到足够低时，原子的动量不确定度大大降低，同时它们的物质波长大大增加（根据海森伯不确定性原理），当原子的物质波长可以和原子间的平均距离相比较时，本来各自独立的原子会相干起来，很多原子会用统一的步伐运动，变成一群“集体主义”的原子，这些原子只需要用一个波函数来描述，“凝聚”在一个相同的量子态上。当物质处于玻色-爱因斯坦凝聚态时，所有粒子都处于能量的最低态，并且有相同的物理特征，这种物质态将粒子的量子特性通过宏观的方式表现出来。

原子气体从经典气体转变成玻色-爱因斯坦凝聚的过程是一种二级相变。二级相变的定义是：两相的化学势和化学势的一级偏导数相等，但化学势的二级偏导数不相等的相变过程。相变时没有体积变化和相变潜热。在相变点，两相的体积、焓和熵的变化是连续的。通俗一点说，二级相变的特征是：在发生相变时，体积不变化的情况下，也不伴随热量的吸收和释放，只是热容量、热膨胀系数和等温压缩系数等的物理量发生变化。典型的二级相变有正常液态氦（氦 I）与超流氦（氦 II）之间的转变，正常导体与超导体之间的转变，顺磁

体与铁磁体之间的转变，合金的有序态与无序态之间的转变等。物理的研究往往从相似现象的类比开始作为突破口，在 1924 年玻色-爱因斯坦凝聚的思想被提出后，科学家开始思考不同二级相变现象之间的联系。第一个引起大家注意的便是氦 4，它在温度为 2.17 K 以下时，具有超流现象，该现象首先被昂内斯（H. K. Onnes）发现，并因此在 1913 年获诺贝尔奖物理学奖。

1938 年，伦敦指出：超流可能具有氦原子的玻色-爱因斯坦凝聚特性。但是很长一段时间，人们都无法将超流的物理特性和玻色-爱因斯坦凝聚直接联系起来，直到 1950 年，彭罗斯（O. Penrose）和昂萨格（L. Onsager）在研究超流的长程作用时才发现它们具有玻色系统的关联性。由此，他们推断在超流氦中，只有 8% 的原子具有玻色-爱因斯坦凝聚特性。和低温液氦中的阻尼消失形成超流相似，某些金属在低温下会失去电阻而形成超导，这一现象首先由昂内斯于 1911 年发现，解释这一现象的微观理论在 1952 年由巴丁（J. Bardeen），库珀（L. N. Cooper）和施里弗（J. R. Schrieffer）给出。这三位科学家也因此获得 1972 年的诺贝尔物理学奖。

该理论指出，在低温条件下，金属中自旋相反的自由电子会形成很强的关联——库珀电子对，这样的电子对对周围环境不“敏感”，所以电阻就消失了。尽管单个电子是“费米子”，但它们形成的电子对却和“玻色子”相似，于是超导

的相变和玻色-爱因斯坦凝聚相似。但是，由于超流和超导现象中系统中的相互作用非常强，导致系统非常复杂，难以对玻色-爱因斯坦凝聚现象进行充分地研究。值得一提的是，关于超流体中无摩擦现象的研究获得了 1962 年诺贝尔物理学奖。关于超流的理论和实验研究获得了 1996 年和 2003 年的诺贝尔物理学奖，而超流研究中的很多进展对玻色-爱因斯坦凝聚的研究也有着非常重要的借鉴作用。

3. 玻色-爱因斯坦凝聚如何实现

玻色-爱因斯坦凝聚的实验系统非常复杂，但是仔细考察之后还是有规律可循的。整个实验系统都以降低原子气体的温度和提高其相空间密度为目标。首先，如前文所说，原子气体需要在一个超高真空的环境中，这样才能尽量减少背景气体对原子气体的碰撞。一般来说，要实现玻色-爱因斯坦凝聚，系统真空压强不能超过 10^{-10} mbar，这样的真空压强下背景气体碰撞对应的冷原子气体寿命约为 30 s，这样的时间刚刚足够凝聚体的形成。但是需要注意的是，由于真空背景中我们需要的原子样品的密度太低，所以如果希望从真空背景中收集到足够数量的原子来实现凝聚体是不现实的，那么很自然的，科学家想到的处理办法是先从另一个真空环境中收集足够多的原子，然后把原子转移到实现凝聚体的腔进行进一步的冷却。由此凝聚体实验的真空系统也是多种多样的。例如，在 MIT 的克特勒小组的第一个凝聚体实验系统中，他们先使用热原子炉

喷射出钠原子束，然后用塞曼冷却的办法使原子束减速，在原子的速度合适的时候再用磁光阱收集成冷原子团。

有些实验小组的凝聚体实验系统中，使用了两个真空腔的结构，第一个真空腔中背景气体中的铷原子数量足够多，先使用激光冷却的办法从背景气体中收集一个冷原子团，然后用一束激光把冷却后的原子推送到另一个真空腔内，再用激光冷却的办法重新收集。

另外三种实验系统中，也都采用了双真空腔的结构，区别在于转移样品原子的方法不同，一种采用多个磁场线圈配合导引的办法把冷原子引导到第二个真空腔，另一种采用单个磁场线圈移动的办法转移冷原子，第三种方法利用了大失谐高强度的光偶极阱，通过改变光腰位置来改变势阱底部的位置，从而移动冷原子团；还有一种巧妙的单个真空腔的结构，也实现了凝聚体。这种方法中，样品原子平时吸附在真空腔的表面，真空压强维持在 10^{-10}Pa 以下，需要收集冷原子团时，用紫外线照射真空腔，迫使真空腔内壁吸附的样品原子扩散到背景中，此时真空压强为 10^{-8}Pa ，这样的真空压强足够高，能从中收集到足够的冷原子，又足够低，能满足激光冷却所需要的真空压强，当冷原子收集完成后，关闭紫外线，腔内的真空会在几秒钟内恢复到最初的状态，此时真空环境又足够好到实现凝聚体。这样的凝聚体真空腔能够大幅度地缩小体积，并且由于原子样品是循环使用的，所以仅

需要极少量的样品，适合实现可移动的凝聚体实验系统。

在真空条件被满足后，科学家需要用尽浑身解数来降低原子气体的温度并提高其相空间密度了。激光冷却的方法进入了大家的视野。该方法利用了光与原子相互作用时，原子总是吸收定向的光子而散射无确定方向光子的性质，使得原子能够获得确定方向的冲量。最初的激光冷却技术虽然可以制备温度很低的冷原子团，但是这些技术手段仅仅在动量空间有效地收集原子，在增加原子气体的位置空间密度方面却并不那么有效，所以虽然原子团的温度很低，原子的物质波长变长了，但是密度也很低，原子间的平均距离较其物质波长大不少，原子气体无法形成凝聚。磁光阱的出现改善了这种状况。磁光阱的想法由当时还在巴黎高师做塔努基学生的达利巴尔（Dalibard）提出，被朱棣文和 MIT 的普里查德（Pritchard）共同采用并合作实现。磁光阱由一对反亥姆霍兹线圈和 3 对对射的激光组成，原子感受到的激光作用力不仅能够在动量空间收集原子，同时也能够在位置空间收集原子。磁光阱的方法同时降低了原子气体的温度和提高了其相空间密度，但是仍然不能使原子达到凝聚，不过，我们总算离凝聚的原子气体近了一步。

磁光阱能够降低原子气体的温度，但是这种方法能够达到的温度有一个极限，并不能无限地降低温度，这个极限叫做多普勒冷却极限，和冷却光对准的原子激发态的

寿命有关系。但是激光冷却能够达到的温度比这个极限可低多了。所以为了充分利用激光冷却，在磁光阱过程后，通常会对原子做“光学粘团”的处理，这个过程中磁场线圈的电流关闭，冷却光的失谐增加，它的物理机制比磁光阱要复杂一些，涉及原子的多能级结构，而不是磁光阱过程中简单的二能级结构。这个过程可以极大地降低原子气体的温度，同时原子气体的密度会有所增加，权衡起来是有益于原子最后的凝聚的。在有些实验中为了补偿光学粘团过程中原子气体密度的损失，会增加暗磁光阱的过程，暗磁光阱是在磁光阱的基础上挡住激光的中心部分，这样冷原子团中心的一个区域内是感受不到激光的。如果这个区域内的原子速度足够低，则逃不出这个区域，如果这个区域内的原子速度还不够低，能够逃出去，进入有光的区域后会再次被冷却和收集到中心，直到无法逃逸，这样原子气体的温度能够降低，相空间密度也能够有效地增加。

此时的原子气体虽然温度很低，但是仍然没有达到凝聚的条件，为了获得凝聚体，科学家仍然需要进一步地对原子气体进行冷却和压缩。这时一个非常朴素但非常有效的办法出现了，它就是蒸发冷却。

蒸发冷却的想法真正是朴素到了极点，如果茶水太热想凉得快一些怎么办，最直接的办法是用扇子扇，气流带走了水中温度较高的部分，即水蒸气，加速了蒸发，就可以降低茶水的温度。从中我们可

以看到蒸发冷却实际需要两个要素：一是一个杯子，用来约束茶水，不让它流走；二是一把挥动的扇子，它让茶水中温度较高的部分加速蒸发，离开茶水的同时带走了大量的动能。对于冷原子气体，科学家也是这样做的。首先需要把冷原子团用容器盛起来，但是不能用磁光阱这样的容器，因为磁光阱的过程一直伴随着原子对激光的吸收和辐射，这会造成极大的加热。然后需要一把合适的扇子，能够针对温度较高的原子有更强的作用，把它们驱逐出容器，留下能量更低的原子。对于中性原子来说，磁阱是一种选择，光偶极阱是另一种选择。这两种势阱各有利弊。磁阱从大类上来分可以分为普通的线圈磁阱和微磁阱。

普通的线圈磁阱利用密绕的线圈或者非常高的电流产生强大的磁场来囚禁原子云，微磁阱的电流没有那么大，因此原子云需要和通电流的导线距离非常近，并且原子云的位置需要控制得更加精确，这样才能获得需要的势阱。对于普通的线圈磁阱，其价格最便宜，制作最容易，控制相对比较方便；微磁阱由于原子距离通电导线非常近，所以要求导线所在表面非常光滑，所以加工的难度和价格更高。

光偶极阱利用激光对原子的偶极力没有饱和效果的性质形成。当激光的频率偏离原子的共振频率很远且光强很高时，原子能感受到巨大的光偶极力，同时吸收光子的几率又非常小。这样就能形成一个寿命很长同时又很深的势阱。光偶

极阱需要非常高的激光功率以及非常好的激光模式，这些意味着更高的经济代价才能获得满意的光偶极阱。

由于形成磁阱的机制不同，所以蒸发冷却的手段也不同，但是基本的原则是相同的，都是迫使能量高的原子从势阱中逃离，剩下能量低的原子。在磁阱中，蒸发冷却时需要使用一个扫描频率的射频场作用在原子上，其频率对应不同势阱高度处的磁场造成的相邻磁子能级之间的频率差，这样射频场的频率由高到低地变化，就可以与处于势阱中能量由高到低的原子发生共振，让它们跃迁到磁阱的非束缚态，从而达到蒸发冷却的目的。光偶极阱中的蒸发冷却更加灵活，通常有两种办法。一种是直接降低激光功率，从而减少势阱的深度，能量高的原子自然就从阱中溢出，从而达到蒸发的目的；另一种是把光阱中的原子制备到某一个非零的磁子能级，然后用一个强度扫描的磁场作用在原子上，这样光阱在不同的磁场强度中相当于被倾斜了不同的角度，有效的势阱深度也发生变化，从而达到蒸发的效果，这种方法现在是蒸发冷却的方法中速度最快的，整个过程只需要不到两秒的时间就能够获得凝聚体。

在使用蒸发冷却成功得到凝聚体后，还需要对其进行观察和测量，“眼见为实”。否则无法确定是否成功地获得了凝聚体。对凝聚体观测的主要手段是用激光和凝聚体相互作用，然后通过观察作用前后激光的变化来判断凝聚体的性

质。测量有两种，一种是破坏性的测量（吸收成像法），这种方法在某个时刻使用与样品原子近共振的激光作用在凝聚体上，通过观察探测光被原子云吸收的情况来判断其特征；另一种是非破坏性的测量，这种方法使用非共振的探测光作用在凝聚体上，通过观察探测光被原子散射的光与未被散射的光之间的干涉来观测原子云的物理性质。一般来说，实验室中获得的蒸发冷却末期的原子云的尺寸很小，如果直接在图像中观察这样的原子云，得到的数据的误差会非常大，有时甚至不可能对数据作出准确的判断，所以实验中原子云会被从势阱中释放出来，然后在重力的作用下一边自由下落，一边扩散，经过一段时间后再对原子云进行观测。科学家获得原子云的图像后仍然需要判断其获得的图像中是否出现了凝聚体。

凝聚体在原子云的图像中有着非常明显的特征。

首先，凝聚体的动量宽度非常小，理想的凝聚体的动量宽度甚至可以达到零，而实际的凝聚体的扩散主要是由于凝聚体中原子之间的相互排斥作用引起的（至于为什么一般的凝聚体的原子间是排斥的相互作用，这又是一个很长的故事了，简言之，只有排斥相互作用的原子才能形成大量的凝聚体；而相互作用为零的原子在蒸发冷却过程中无法有效地降温，原因是蒸发冷却中需要原子间的碰撞使得整个原子气体重新达到热平衡，否则蒸发冷却只能降温而无法有效增加相空间

密度；吸引相互作用的原子气体在形成原子数过多的凝聚体时，会由于相互吸引形成分布越窄，密度越大，相互作用越强，分布更窄这样的正向反馈，最后使得整个凝聚体崩溃，锂原子之间是吸引相互作用，理论上它形成凝聚体的原子数不能超过 1400，后来实验中实现锂的凝聚体的数量约为 1000，与理论相符）。而未凝聚的部分的扩散主要是由于其动量宽度。通常凝聚体的扩散速度会比热原子背景的扩散速度小，所以通过观察原子云的分布可以很容易判断出是否出现凝聚体。另一个方面，由于凝聚体和热原子的扩散机制不同，所以它们扩散过程中也会出现不同的现象。对于各向异性的凝聚体，尺寸大的方向相互作用小，扩散慢；尺寸小的方向相互作用大，扩散快。所以凝聚体在扩散足够长的时间后原先尺寸大的方向上的尺寸反而会小于原先尺寸小的。对于热原子背景而言，虽然它的初始尺寸和势阱的形状有关系，但是它各方向的动量宽度相同，所以在扩散足够长的时间后，初始尺寸的影响非常小了，影响它的形状的主要是动量宽度，所以这个部分在各方向上的尺寸基本上是相同的。这个现象是判断各向异性的磁阱中是否出现凝聚体的一个非常重要的判据。

4. 玻色 - 爱因斯坦凝聚的研究进展

玻色 - 爱因斯坦凝聚的实验实现在其想法产生 71 年后才成为现实，它的实现本身就是一项激动人心的成就，但是科学工作者惊人

的探索欲望激励着他们在其基础上做出了更多优秀的研究工作。与玻色 - 爱因斯坦凝聚相关的研究非常的丰富，从 20 世纪 90 年代开始，到 21 世纪的头十年，可以说是它的研究工作的黄金 20 年，相关的研究大致可以分为几个类别。

(1) 不同类型玻色 - 爱因斯坦凝聚的实现

玻色 - 爱因斯坦凝聚在实现之前，有很多小组都在尝试用不同的方法实现不同类型原子的凝聚体。在最初的几种凝聚体实现之后，陆续又有多种其他类型的凝聚体实现。据不完全统计，全世界现在在超过 100 个小组从事冷原子物理方面的研究，至少 45 个小组实现了玻色 - 爱因斯坦凝聚。至今为止，实验上实现了玻色 - 爱因斯坦凝聚的原子有铷元素的两种天然同位素：铷 87 和铷 85，钠元素的同位素钠 23，锂的同位素锂 7，自旋极化的氢原子，亚稳态的氦 4，钾元素的同位素钾 41，铯元素的天然同位素铯 133，以及稀土元素中钇元素的同位素钇 174。

不同的原子导致实现凝聚的方法也不尽相同，即使是同一种原子，实现玻色 - 爱因斯坦凝聚的方法也可能是多种多样的。甚至有些原子用直接冷却的方法很难获得凝聚，还需要借助其他的原子帮助它冷却下来。例如钾 41 原子就是这样，由于钾 41 原子间的碰撞很弱，直接对它蒸发冷却非常困难，但是钾 41 原子和铷 87 原子之间的碰撞较强，所以在实验中冷却铷 87 原子的同时，也可以通过铷和钾之间

的碰撞使得钾原子气体快速达到热平衡，从而间接达到冷却钾原子气体的效果。

(2) 玻色 - 爱因斯坦凝聚的基本物理性质研究

在实现了玻色 - 爱因斯坦凝聚后，科学家的第一反应就是立即展开了对其基本物理性质的研究。凝聚体是宏观量子气体，可以看作是宏观的物质波。波的一个重要特性是其干涉现象。在玻色 - 爱因斯坦凝聚实现后不久，克特勒小组就观察到了凝聚体的干涉条纹。当然，还有很多与凝聚体相干性有关的实验现象也不断地被报道出来，但是最为直接体现其相干性的还是它的干涉现象。

前文中提到的凝聚体从势阱中释放后不同于经典气体的膨胀现象也是其重要的性质之一，这个现象主要体现了凝聚体极窄的动量宽度以及排斥相互作用在其膨胀过程中的作用。另一个能够体现凝聚体排斥相互影响的实验现象是达利巴尔小组观察到的“呼吸模式”。当各向异性的凝聚体在势阱受到一个小的扰动时，凝聚体的平均位置不仅会在势阱中简谐振荡，同时凝聚体的形状也会出现振荡，就像呼吸一样。这是由于凝聚体被集体激发后，不同方向上有不同的密度分布，从而有不同的本征频率，从而形成“呼吸模式”。而另外两个凝聚体集体激发的现象是孤子和涡旋。孤子是非线性微分方程的一类稳定的、能量有限的不弥散的解，两个相对传播的孤子能够相互穿过、互不影响。很多小组用各种办

法观察到了凝聚体中的暗孤子和亮孤子。JILA 利用一束非共振的光脉冲扰动了一下一个双内态组分的凝聚体，从而观察到了暗孤子，由于凝聚体处于一个球形的势阱中，孤子受到扰动并形成了一个环状的涡旋。莱斯（Rice）大学的休利特（Hulet）小组和东京大学分别用费什巴赫（Feshbach）共振改变散射长度的办法产生了凝聚体中的亮孤子。

由于玻色-爱因斯坦凝聚体是一种长程相干的物质，整个的凝聚体可以用一个单粒子波函数来描述，它具有超流的特点，理论表明，这种单粒子波函数在处于旋转状态时，具有量子化的现象，这种现象称作量子涡旋（Vortex），这一现象首先由 JILA 的康奈尔和韦曼小组在铷 BEC 中证实，他们用一束旋转的激光对凝聚体进行搅动，观察到了量子涡旋，为了进一步证实玻色-爱因斯坦凝聚体具有超流的特性，MIT 的克特勒小组通过改变偏置磁场的方法对凝聚体进行扰动，观察到了多核的晶格状涡旋。

凝聚体中的各种相互作用也是研究的热点之一。巴黎高师的一个小组在实现了氦 4 的凝聚体后观察到了非常漂亮的两个组分碰撞后 s 波散射的图像（图 1）。

费什巴赫共振是利用磁场调节散射长度的重要手段，克特勒小组在 1998 年首先观察到了凝聚体的费什巴赫共振现象，在克特勒小组的另一个实验中，费什巴赫共振被用来调节散射长度，使得凝聚体的非弹性碰撞大大地增强。

(3) 玻色-爱因斯坦凝聚的原子光学

玻色-爱因斯坦凝聚作为一种宏观量子态，可以看作是一种单色性非常好的物质波源。以它作为基础的原子光学也得到了长足的发展。如果把凝聚体一份一份地从势阱中耦合输出，就形成了脉冲原子激光，如果把凝聚体连续地从势阱中耦合出来，则是连续原子激光。原子激光一方面可以用来进一步研究原子的光学性质，另一方面也有可能原子光刻等方面有所应用。

另一方面，用外场精密操控凝

聚体动量的研究工作也硕果累累。MIT 的克特勒小组利用凝聚体的物质波的特性形成物质波光栅，能够定向散射入射的光子，实现了物质波的超辐射瑞利散射，北京大学的冷原子研究小组利用双频激光实现了铷原子物质波前向与后向超辐射散射的精密操控。

NIST 的菲利普斯小组利用长脉冲的驻波场散射凝聚体，实现了凝聚体的布拉格散射（图 2），用这种方法可以往任意方向，任意比例地散射凝聚体，并且能够一步一步地控制凝聚体的平均动量。

这个小组还利用超短脉冲的驻波场散射凝聚体，实现了凝聚体的卡皮查-狄拉克（Kapitza-Dirac）散射。同样是这个小组，配合使用超辐射和布拉格散射过程，实现了凝聚体的物质波放大。

这些操控凝聚体动量的方法为凝聚体基础上的干涉仪打下了坚实的基础。另外还有一些操控凝聚体动量态的方法，例如利用马约拉纳（Majorana）跃迁等。

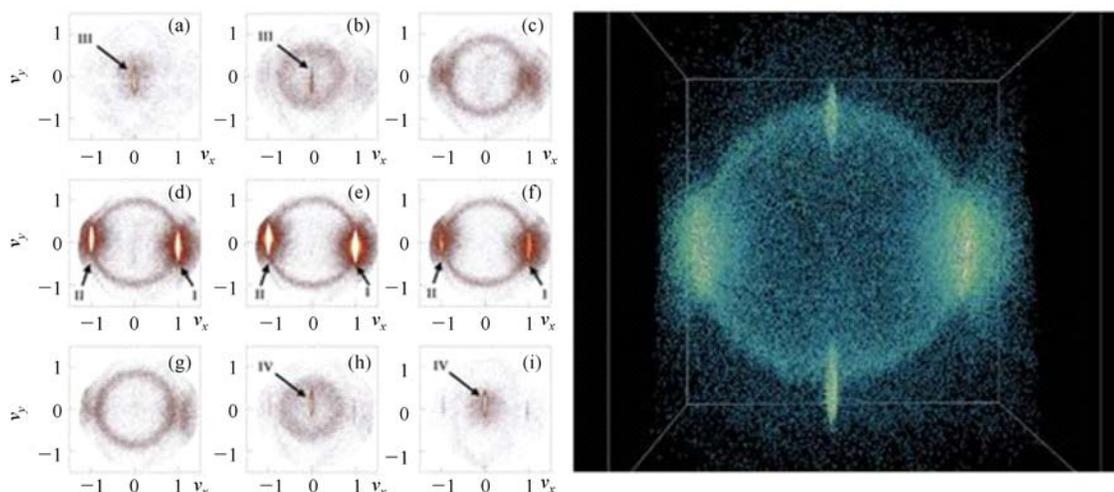


图 1 亚稳态氦 4 凝聚体的 s 波散射

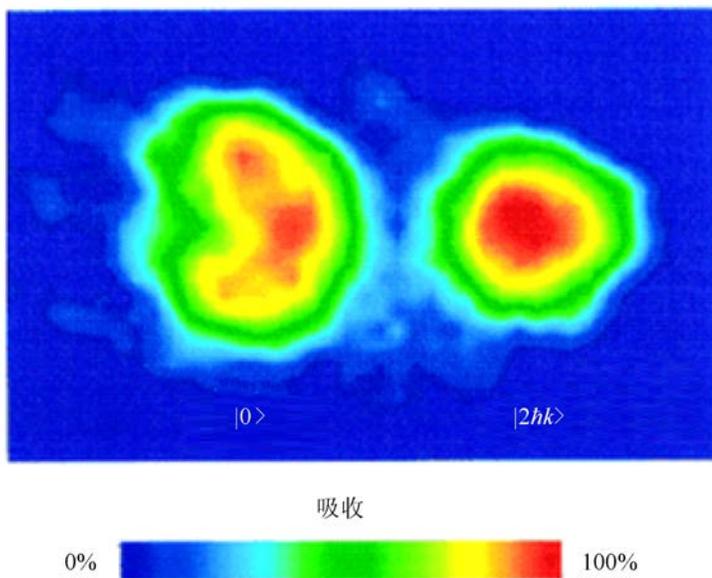


图2 凝聚体的布拉格散射

(4) 周期势阱中的玻色-爱因斯坦凝聚与量子模拟

玻色凝聚在科学上的另一项贡献是量子模拟，由于利用激光形成的周期势阱囚禁的玻色-爱因斯坦凝聚体，如同固体中的晶格，既具有隧穿效应，又受到光学势垒阻碍的影响，调节激光的波长与光强，可以形成不同长度的晶格与不同强度的势垒，由此可以模拟凝聚态的许多著名的相变现象。

光晶格中的凝聚体（图3）相关的研究工作中，超流态和MOTT绝缘态之间相变的工作是相当引人注目的一个。德国的布洛赫（Bloch）小组把凝聚体绝热地装载入一个三维光晶格，当光晶格的势阱深度较浅时，不同晶格之间的原子仍有较大的隧穿几率，凝聚体的长程相关性保留，气体还是超流体；当光晶格的势阱深度增加到一定程度时，单个晶格中的原子隧穿到其他晶格的几率大大减小，原子被限制在一个固定的晶格中，原子气体不再具有

长程相关性，此时原子气体发生相变，成为MOTT绝缘态。如果此时降低光晶格的深度，原子气体重新回到超流态，又具有长程相关性。

隧穿现象是半导体和超导现象研究的热点之一，相关的工作获得了1973年的诺贝尔物理学奖。

周期性势阱中凝聚体的隧穿效应与超导和超流中的隧穿现象的联系引发了科学家对光晶格中凝聚体的相变的研究工作的热情。现在，科学家正在尝试造出各种各样形式的光晶格，以期待实现各种不同的相变。另一方面，实验物理学家设计出了超高分辨率的成像系统，用于观察单个晶格中的原子数，以此更为精确地观察光晶格中凝聚体的状态。这些努力是卓有成效的，一方面科学家已经造出特定形式的光晶格，在光晶格中造出了铁磁态（所有原子有相同的自旋取向）和反铁磁态（原子的自旋态分布以正反相间的形式存在）。另一方面，更加精密的原位探测（图4）对于光晶格中的凝聚体的观察证实了超流态与MOTT绝缘态共存时的“婚庆蛋糕模型”（图5），也使得光晶格中的凝聚体的操控精确成为可能。

利用光学的势垒形成的蜂窝状的势阱，可以模拟石墨烯结构中

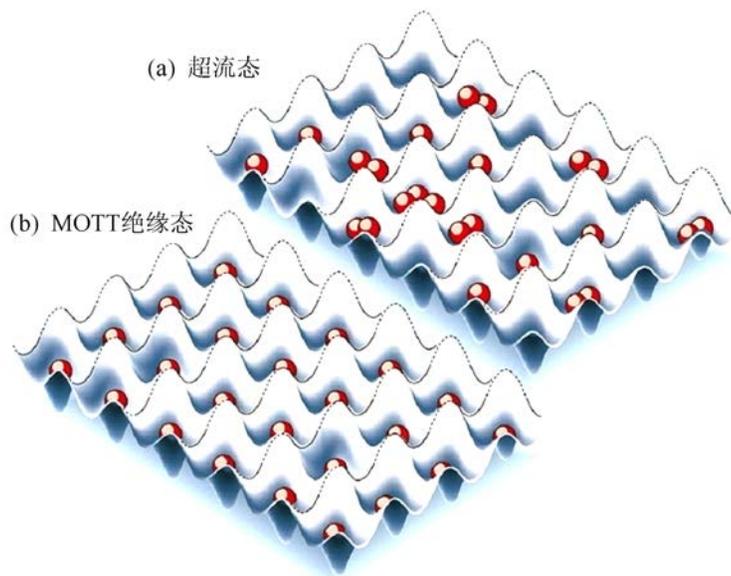


图3 周期性光势阱中的冷原子示意图，调节光晶格不同的光学势垒，其中的凝聚态可以从(a)超流态变化到(b)MOTT绝缘态

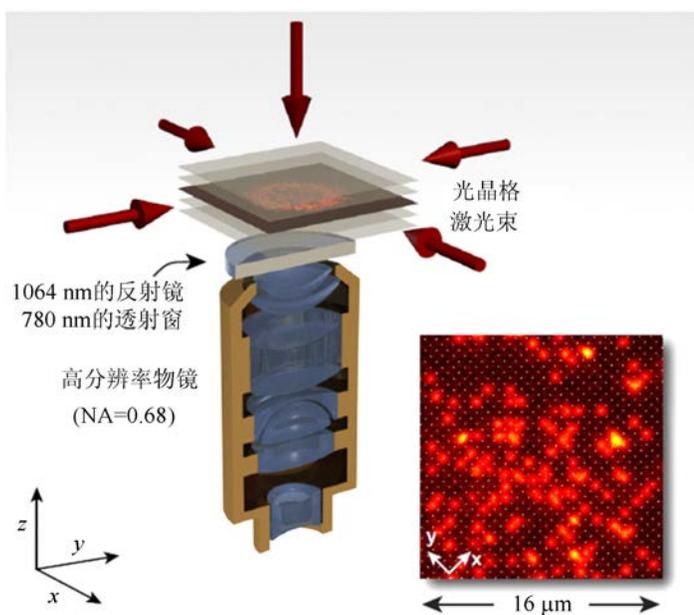


图4 对光晶格中的冷原子进行原位探测，成像分辨率与单个晶格的尺寸相当，能观察单个晶格中的原子

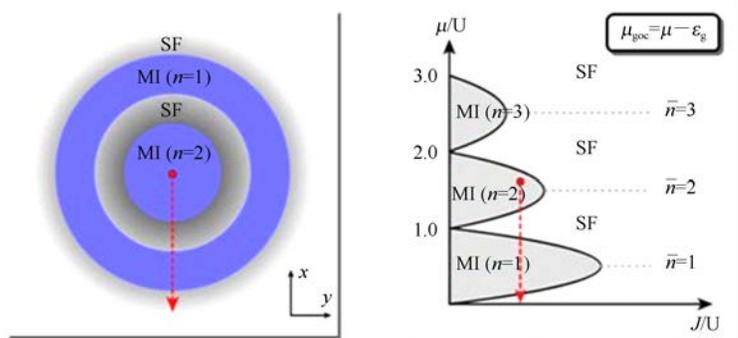


图5 理论上预言了超流与MOTT相变的相图

的狄拉克点的特性，通过控制激光光学势垒强度和构型，得到狄拉克点的融合、打开等特性，非常直观地模拟拓扑绝缘体奇特的量子特性（图6）

光晶格中的凝聚体的有趣现象还不止上面的这些。例如，英国的一个小组把凝聚体装载到一个足够深的二维光晶格中，然后在第三个方向上让原子团分成两个部分，让它们在磁阱中来回振荡，然后观察这两个部分的相互碰撞，竟然能够观察到这两个部分完全互不干涉，相互穿过而没有一点耗散，就

像理想的两个刚性小球做牛顿摆动运动（图7）。还例如，布洛赫小组在最近把凝聚体装载到光晶格里后，用费什巴赫共振调节原子之间

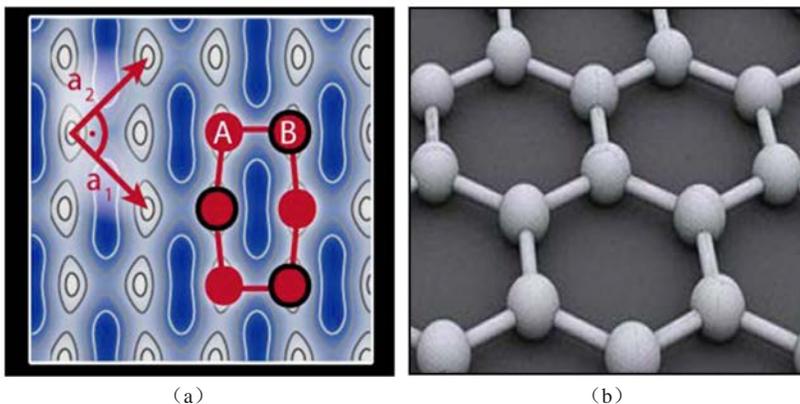


图6 激光形成的光学势垒构型 (a) 与石墨烯的蜂窝状结构 (b) 相似

的散射长度，使得凝聚体稳定地处于系统的激发态，那么整个系统温度为负（负温度实际应该比任何正温度的温度都要高，它处于激发态，和任何正温度的体系发生热接触的时候都是给出热量的一方）。

5. 费米气体——量子兼并气体

在1995年获得玻色子凝聚——玻色-爱因斯坦凝聚后，科学家一直希望能得到费米简并气体。从统计物理的角度讲，在玻色或费米气体温度低到满足简并条件： $\rho = n\lambda_D^3 \geq 1$ ，但是量子简并的实质是不同的，对于玻色气体，量子简并的效应是发生相变——玻色-爱因斯坦凝聚，而对于费米气体，量子简并的效应是发生一种从经典行为到量子行为的连续变化，量子简并条件正是从经典行为到量子行为的连续变化的交叉点。

第一个费米气体简并实验由美国JILA的金秀兰（Deborah Jin）小组首先实现，金秀兰原是康奈尔的博士后，博士后出站后留在JILA，金秀兰小组于1999年在磁阱中通过协同碰撞冷却实现了钾原子的费米气体简并，之后低温费米气体的实验与理论像雨后春笋般

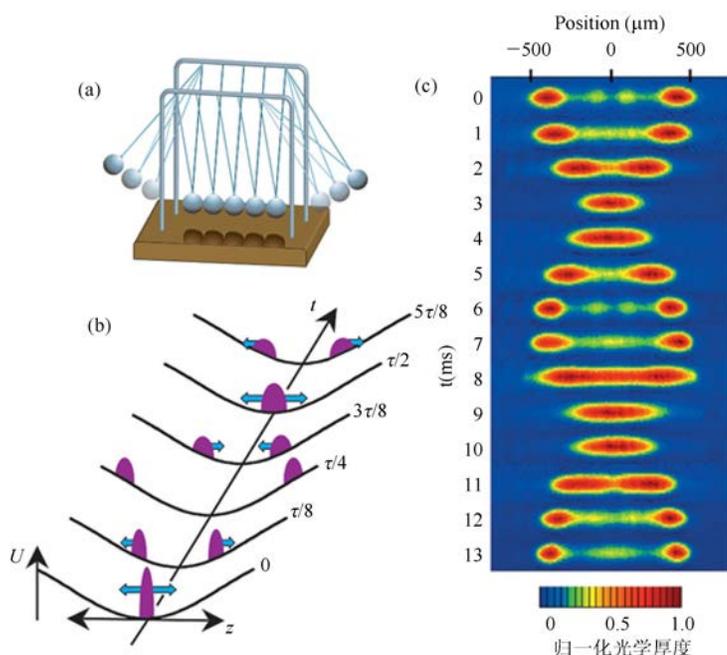


图7 凝聚体实现的一个量子牛顿摆: (a) 经典牛顿摆, (b) 不同时刻势阱中凝聚体的位置, (c) 不同时刻势阱中凝聚体振荡实验结果

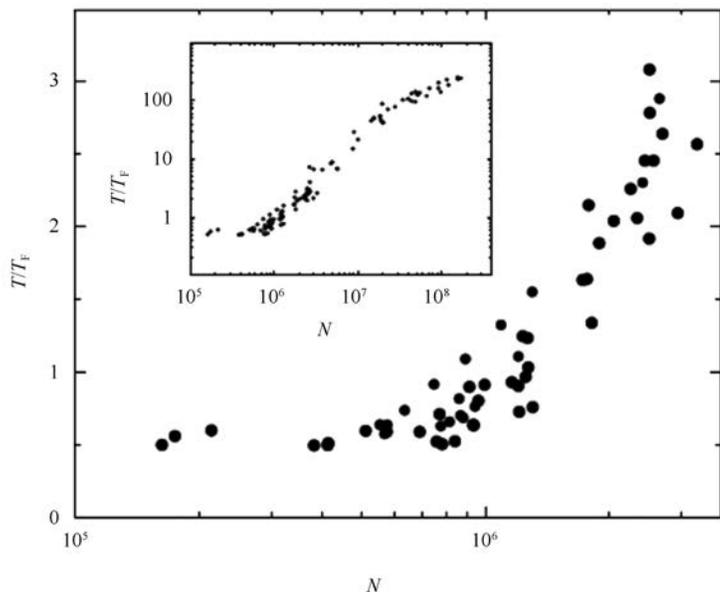


图8 JILA 小组利用钾 40 获得第一个费米气体简并实验的结果

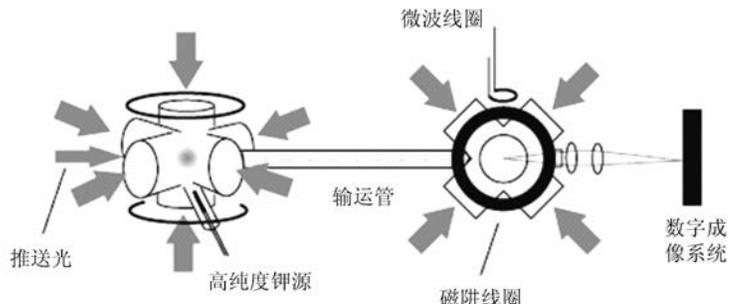


图9 JILA 小组用钾 40 获得第一个费米气体简并的实验装置

不断涌现。由于费米量子简并的实验观察是近十多年的事情,因此由此发生的许多精彩的物理现象深深地吸引着物理学家。

由于费米气体遵循泡利不相容原理,因此单组分的费米气体没有 s 波碰撞,不能进行如同玻色凝聚实验中的蒸发冷却,只能采用协同碰撞或光阱冷却等新方法。金秀兰首先通过将钾 40 分别制备到钾的两个磁超精细能态上,这样就可以利用 s 波碰撞进行冷却,她成功地将钾原子冷却到了费米温度以下(约 100 nK)。图 8 是金秀兰小组首次观察到钾气体到量子简并状态的实验结果,图 9 是其采用的实验装置图示。

为了详细研究费米气体的性质,巴黎高师的萨罗门(Salomon)小组利用锂 6 原子观察到了简并条件下锂原子气体费米海的现象(图 10)。从这里可以看到,锂 6 原子(费米子)与锂 7 原子(玻色子)在同样的温度下,出现的动量分布是不一样的,锂 7 为玻色凝聚,因此动量凝聚在零动量态上,而锂 6 为费米子,由于泡利不相容原理,原子相互排斥,没法在相同的动量态上凝聚。

理论预言,当零温($T=0\text{ K}$)条件下,两组分的费米子体系的基态形式取决于粒子间相互作用强度。若其散射长度 $a < 0$ 且 a 较小,则为 BCS 超流。反之若散射长度 $a > 0$ 且 a 较大,则两个自旋相反的费米子结合成一个弱束缚态的分子,而该分子行为类似于玻色子,将形成玻色-爱因斯坦凝聚。在两

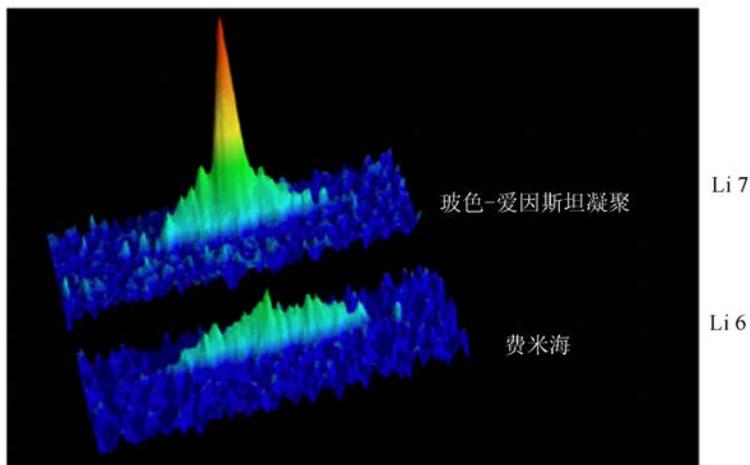


图 10 锂原子气体费米海的现象

个区域之间，费米气体的行为连续变化，形成一个 crossover 区域，而非相变（图 11）。

为了研究费米子的强相互作用，科学家通过改变磁场，形成费什巴赫共振，改变原子的散射长度，使它们从负到正，从吸引到排斥。这样，对钾 40 费米气体就在散射长度为负的情况下形成分子，从而形成玻色凝聚。2003 年 JILA 的金秀兰小组首先观察到了钾 40 在散射长度为正的情况下形成分

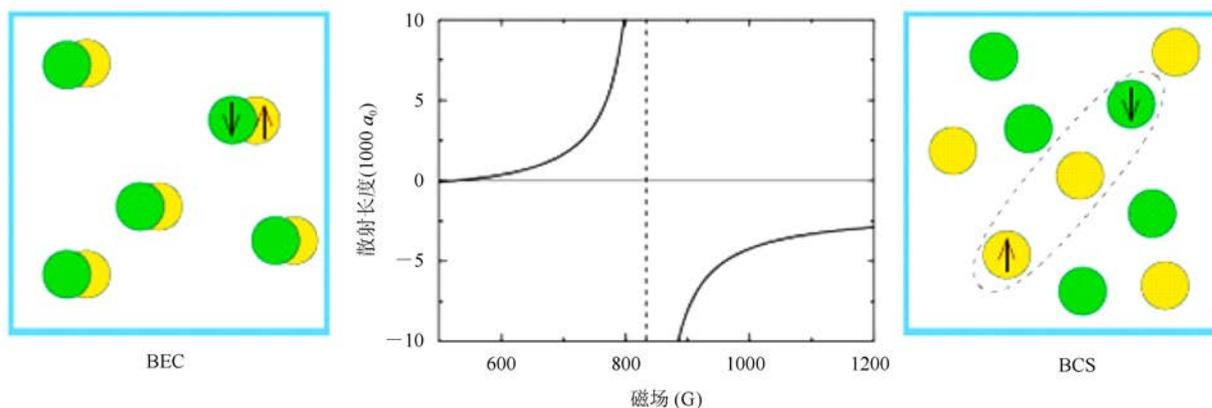


图 11 BEC 到 BCS 的交叉区

子（玻色子），由于温度低于临界温度，分子凝聚成玻色-凝聚（见图 12）。为此 2005 年金秀兰被美国科学院评为院士，当年金秀兰为 33 岁，成为美国科学院最年轻的院士。

接着科学家还研究了当费米气体散射长度为正时的行为，观察到它们形成库珀对的情况，并详细研究了从 BEC 分子到 BCS 态以及中间的 BEC-BCS 交叉的情况（图 13），图 14 表示了调节磁场可以观察到散射长度从负到正的变化，从而导致费米子从 BEC 分子到 BCS 态的变化。这里 BEC 分子是费米原子之间的短程相互作用形成

的，而 BCS 态（库珀对）是费米原子之间的长程相互作用形成的。

当费米原子处于自由态的开通道中某一点的总能量与其闭通道中的一个束缚态的能量相等时，两个粒子可以从自由态耦合到束缚态，再耦合回自由态，在此过程中散射长度（即相互作用能量）发生

剧烈变化，该物理现象称为费什巴赫共振。由公式（1）

$$a = a_{nr} \left(1 - \frac{\Delta B}{B - B_0} \right) \quad (1)$$

看出当磁场强度 B 趋于 B_0 时，散射长度趋于 $\pm \infty$ ，即很小的磁场变化就可引起散射长度很大的变化，且容易改变符号。改变磁场，

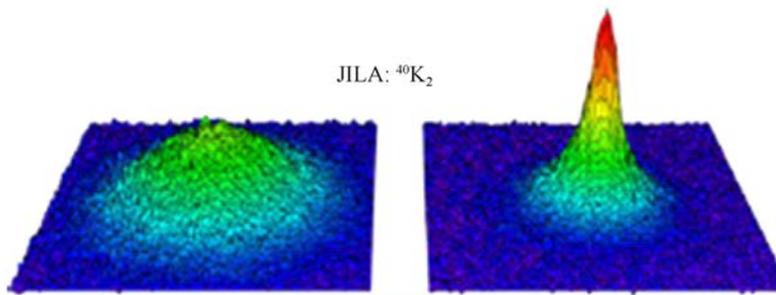


图 12 钾 40 费米气体就在散射长度为负的情况下形成分子，从而形成玻色凝聚

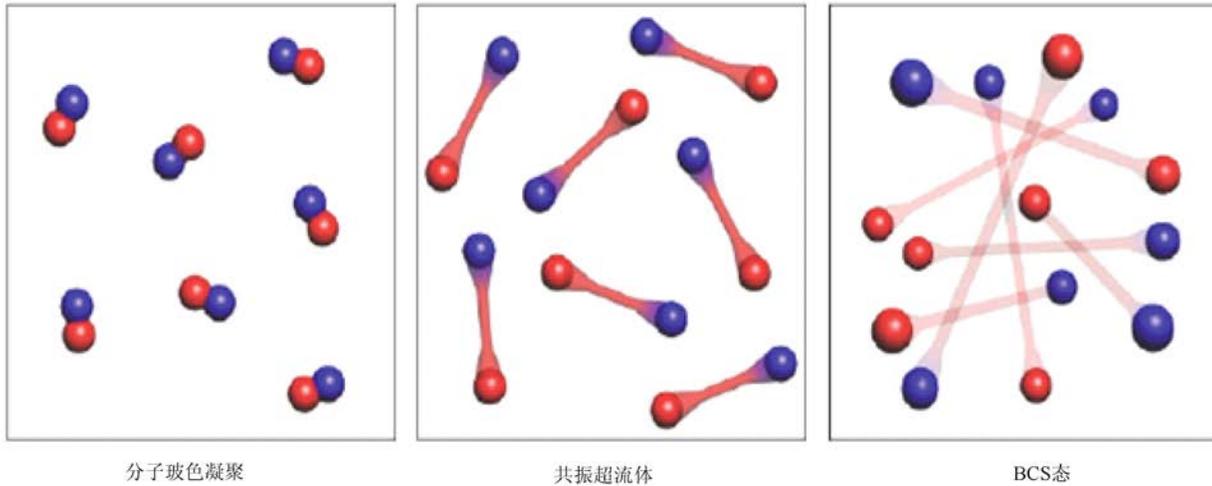


图 13 从 BEC 分子到 BCS 态以及中间的 BEC-BCS 交叉

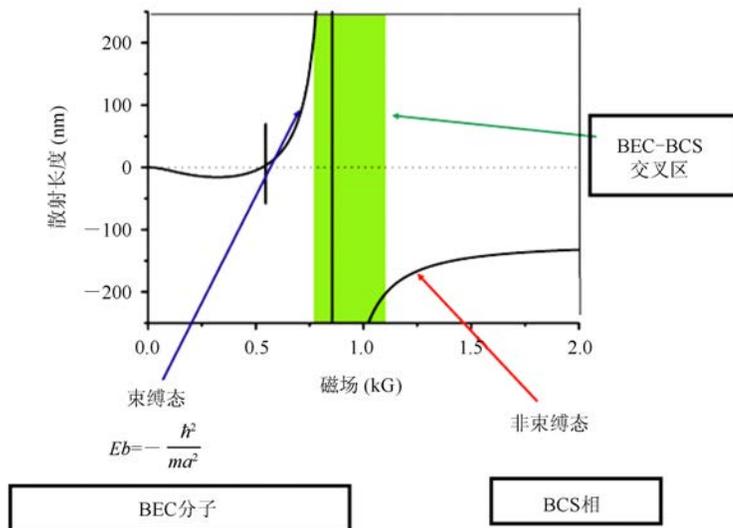


图 14 调节磁场，散射长度的变化导致费米气体从 BEC 分子到 BCS 态的变化

可以将费米原子散射长度 a 从负调节到正，从而形成分子，平均场理论可以得到 BEC 的分子化学势为

$$\mu_M = 2\mu \approx -\frac{\hbar^2}{ma^2} + \frac{4\pi\hbar^2}{2m} \frac{n}{2} 2a, \quad (2)$$

(2) 式右边第一项为孤立分子的动能，第二项为分子之间相互作用能，可见分子的散射长度为原子散射长度的两倍。这些理论需要实验验证，而当年李政道、黄克逊、杨振宁早在 1957 年对零温的量子气体特性做过详细的研究，称为 Lee-

Huang-Yang 修正，如对公式 (2) 的高阶修正为：

$$\mu = \frac{E_b}{2} + \frac{\pi\hbar^2 a_{dd}}{2m} n \left(1 + \frac{128}{15\sqrt{\pi}} \sqrt{nd_{dd}^3} + \dots \right). \quad (3)$$

由于费米简并气体的获得，使得详细研究费米气体在零温的量子气体特性成为可能。2010 年法国巴黎高师的萨罗门小组利用测量了锂 6 原子费米气体从 BEC 分子到 BCS 态的变化交叉区的热力学行为，验证了 Lee-Huang-Yang 修正

的正确性 (图 15)。

6. 玻色 - 爱因斯坦凝聚能做什么

玻色 - 爱因斯坦凝聚在现阶段并不像激光冷却那样在工程中有着非常直接和明确的应用 (激光冷却主要的应用之一就是冷原子频标和冷离子频标)，但是它已经在很多实际应用方面表现出来很深的潜力。例如，基于玻色 - 爱因斯坦凝聚的干涉仪 (图 16) 在微重力环境中的测量精度能够分辨出引力场的影响，这样它可以用来验证广义相对论。高精度的干涉仪在很多方面有用武之地，例如作为陀螺仪用来导航。另外，玻色 - 爱因斯坦凝聚作为一种可精密操控的宏观量子态，可以在它的基础上做丰富的量子模拟的工作，从宏观的黑洞，超新星爆发，到微观的凝聚态物理，晶体结构，其非线性效应还可以用来研究量子混沌，非线性光学等。它在量子光学中也有重要的贡献，哈佛大学的 Hau 小组利用玻色 - 爱因斯坦凝聚把光的群速度降低到十几米每秒，与自行车的速度相当，甚至能够把光子存储在凝聚体中。

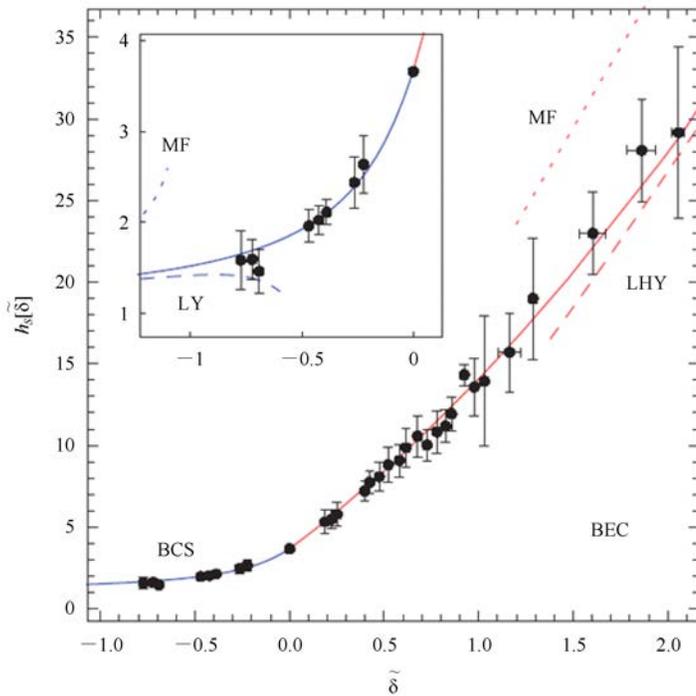


图 15 费米气体双组分状态方程在 BEC-BCS 交叉区的特性的实验结果，虚线为 Lee-Huang-Yang 修正曲线，点线为平均场曲线 MF

另外由于同组分费米气体不存在 s 波碰撞，因此可以用其制造高精度的原子钟等量子仪器。

7. 总结和展望

玻色-爱因斯坦凝聚的概念被提出已经快 90 年了，但是真正有快速进展的时期是最近的二十多年，还有许多有意思的现象等待着科学家去研究，还有很多未解之谜等待我们去发现。玻色子相关的工作正处于黄金期，而费米子相关的工作才刚刚开始。科学探索的路漫漫其修远兮，我们会上下而求索。

(熊炜，清华大学精密仪器系 100084；陈徐宗，责任作者，北京大学信息科学技术学院 100871)

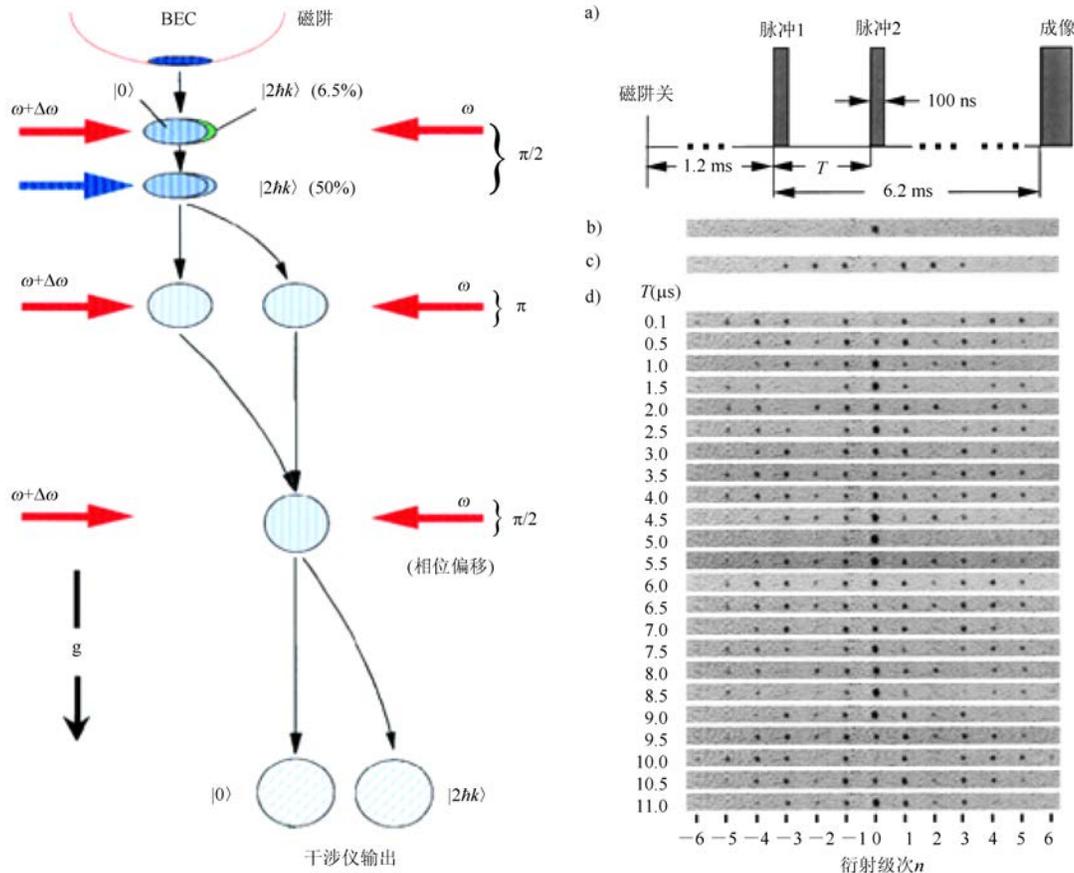


图 16 用凝聚体实现的高精度 Mach-Zehnder 干涉仪 (左) 和 Talbot-Lau 干涉仪 (右)