

极冷：新的物质量子态是如何出现的

(清华大学 郑盟锐 编译自 Chad Orzel. *Physics World*, 2024, (1): 31)

在20世纪的最后二十年里，原子物理学家多次打破宇宙中最冷温度的记录。到了1990年，物理学家已经能够将数以千万计的原子冷却到比绝对零度高几十 μK 的温度。然而，当时他们还想让温度进一步下降一千倍，这将引入一个新的物理学领域，即量子简并。在这种条件下，低温和高密度迫使原子进入两种奇异的物质状态之一：玻色—爱因斯坦凝聚体(BEC)或者简并费米气体(DFG)。

BEC和DFG是纯粹的量子状态，原子的总自旋决定了它们会形成哪一种状态。如果原子中的电子、质子和中子的总数是偶数，它就形成BEC，否则将会形成DFG。与许多突破一样，量子简并的发展得益于世界各地的实验室引入的新技术。而其中一项技术的出现完全是偶然的。

廉价的激光冷却

20世纪80年代中期，卡尔·威曼(Carl Wieman)在美国科罗拉多大学Boulder分校研究铯原子的宇称不守恒。这些研究需要耗时且精确的光谱测量，威曼的博士生瓦茨开发了一种使用二极管激光器来完成这些研究的方法。在花了数年时间研究如何稳定和控制这些廉价的固态设备后，瓦茨想要完成他的博士学位了。因此他和威曼四处寻找短期实验来测试它们，找到的答案是激光冷却。威曼回忆道：“这就是我进入激光冷却研究的原因。”

1986年，瓦茨和威曼成为第一个用激光冷却铯原子束的人。过后的多年里，威曼一直在寻找一个新的科学目标。他最终与竞争对手一起想到了一个非常古老且无可挑剔的科学目标：实现BEC。

一场逐底竞赛

1924年，达卡大学(现孟加拉国)的物理学家玻色意识到普朗克关于热物体光谱的公式可以从控制光子行为的统计规则中推导出来，但是他的论文发表并不顺利，因此他向爱因斯坦寄了一份副本征询他的意见。爱因斯坦非常欣赏这篇论文，安排将其与他自己的论文一起发表。爱因斯坦将玻色发现的光子统计扩展到其他类型的粒子，并指出一个有趣的结果：在非常低的温度下，系统最可能的状态是所有粒子占据相同的能量状态。这种集体状态现在被称为玻色—爱因斯坦凝聚体(BEC)。BEC形成的临界温度由密度决定：密度越低，临界温度越低。激光冷却的原子气体非常稀薄，以至于它们的转变温度在nK范围内，比原子吸收或发射单个光子获得的“反冲温度”还低。因此，实现BEC必须在没有激光的情况下完成。

蒸发制冷

这些问题的解决方案类似于冷却一杯茶的机制。茶中的水分子以不同的速度运动，最快的水分子有足够的能量来挣脱并以水蒸气的形式飘走。由于这些“逃逸者”携带的能量高于平均水平，因此剩余的分子最终会变得更冷。一旦系统的能量通过分子之间的碰撞重新分配，系统就会在较低的温度下达到新的平衡。

蒸发冷却需要两个要素：一种有选择地去除最热原子的方法，以及足够高的原子之间的碰撞率以保持热平衡。第一个要素可以通过将原子从磁光阱转移到纯磁阱中。能量更高的原子需要更大的磁场来限制它们，而这个大的磁场会在原子能级中产生塞曼能移。因此，适当调谐的射频信号就可以将高场中的“热”原子翻转到无法捕获状态，而不会干扰较冷的原子。然而，第二个要素——原子的碰撞率——却是

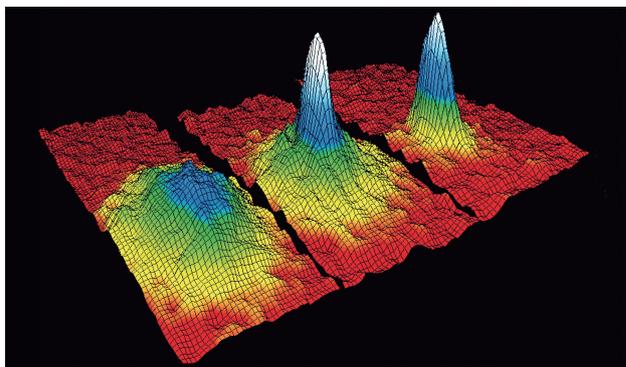


图1 最酷的结果。在1995年夏天拍摄的这一系列图像中，康奈尔和威曼实验室的冷铯原子云中出现了BEC的标志。云中心原子密度的“尖峰”表明那里有许多原子占据相同的量子态

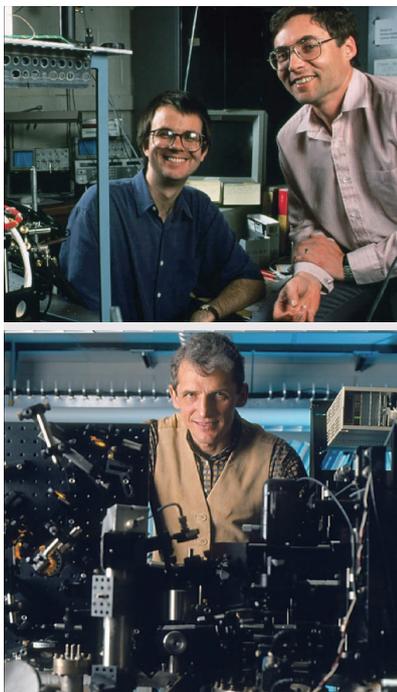


图2 原子驯服者。上图：康奈尔和威曼在他们位于美国天体物理联合研究所(JILA)的实验室中观察到第一个BEC后不久；下图：2001年，凯特勒在他位于麻省理工学院的实验室里，这一年他与康奈尔、威曼分享了诺贝尔物理学奖

实验者无法掌握的。开始追求BEC的团队只能从元素周期表中选择不同的元素，并希望自己的选择是幸运的。

堵上漏洞

实验上，将原子从磁光阱转移到纯磁阱只需关闭激光即可。但是由此产生的“四极矩磁阱”有一个主要问题：磁阱中心的场强为零。在零场下，原子可以将其内部状态改变为不再被捕获的状态。因此需要找到一种堵住原子从磁阱中心“泄漏”的方法。当时，麻省理工学院的凯特勒(Ketterle)提出利用聚焦在磁阱中心的激光来推开原子，而康奈尔和威曼则发明了一种全磁技术。全磁技术只需要在四极线圈的周围添加两个额外线圈，并使用

交变电流驱动，每秒将磁场零点移动数百次，使得原子无法靠近磁场零点。

这两种技术都确实有效。康奈尔和威曼首次证明这一点，他们用激光束照射冷原子云。在这些“快照”过程中，云中的原子会吸收激光中的光子，在光束中留下阴影。该阴影的深度是云密度的度量，而云的大小则表示原子的温度。随着蒸发的进行，快照显示出原子云随着热原子逐渐被移除而缓慢收缩和冷却。

然后，1995年6月，在170 nK左右的温度下，发生了一些戏剧性的事情：原子图像中心出现了一个小黑点，代表原子处于极低的温度和更高的密度。康奈尔说：“中心密度突然上升。如果不是玻色—爱因斯坦凝聚，还会是什么？”他和威曼将他们的一些阴影图像转换成三维图(图1)，热原子显示为一个宽阔的基座，而BEC作为一个“尖峰”出现在中心。这变成了现在标志性的BEC证明。

康奈尔和威曼在1995年6月上旬的新闻发布会上宣布了他们的研究成果。他们的论文于次月发表在*Science*杂志上。9月，凯特勒和同事制作了他们自己的一组3D图，显示当钠原子云达到转变温度时也出现了类似的“尖峰”。康奈尔、威曼和凯特勒因在稀薄原子气体中实现了BEC的成就而分享了2001年诺贝尔物理学奖(图2)。

简并费米气体的实现

1995年初，康奈尔招募了一位新博士后，狄波拉·金(Deborah Jin)。她在BEC气体研究上做出了一系列优秀的工作后，选择了研究另一类超低温行为：简并费米气体

(DFG)。对DFG的追求带来了两个挑战。第一个是，在超低温下，蒸发冷却的重新平衡步骤中所需的碰撞停止发生，因为处于相同状态的费米子无法发生碰撞。为了解决这个问题，他们将一半的原子置于不同的内部状态。第二个问题是，与BEC不同，费米简并原子云一旦达到转变温度就停止进一步收缩。为了弄清楚如何区分简并气体和热云，他们需要进行仔细的建模和精准成像。

尽管面临这些挑战，从一个空房间开始仅仅18个月后，金就发表了对简并费米气体的首次观测。之后，金继续使用激光和磁场将简并原子转化为分子，开辟了超冷化学的新领域。这项工作获得了无数荣誉，包括麦克阿瑟基金会“天才奖”、美国物理学会(APS)颁发的Rabi奖等。但可惜的是，金于2016年因癌症去世。为了表彰她的贡献，APS设立了年度Deborah Jin奖，奖励原子、分子或光学物理领域的杰出博士论文研究。

不断发现的历史

这个系列涵盖了半个多世纪。在那段时间里，使用激光操纵原子的想法从贝尔实验室一位物理学家心中的好奇心变成了众多尖端物理学的基础技术。激光冷却离子现在是量子信息科学发展最重要的平台之一。激光冷却的中性原子为世界上最好的原子钟奠定了基础。康奈尔、威曼、凯特勒和金率先观察到的量子简并系统催生了一个巨大的子领域，将原子物理学与凝聚态物理学和化学联系起来。激光冷却原子对于物理研究仍然至关重要，世界各地的实验室每天都在书写新的历史。