

走向更冷：突破激光冷却的理论极限

(浙江大学 颜波 编译自 Chad Orzel. *Physics World*, 2023, (11): 30)

20世纪60年代后期，少数科研人员开始利用光产生的力来推动小物体。在接下来的十年里，该领域发展出了激光冷却：一种利用多普勒频移使物体减速的强大技术。随着时间的推移，新的激光冷却研究沿着离子和原子这两条平行轨道探索。

在许多方面，离子具有早期优势。由于它们带有电荷，可以感受到强大的电磁力，高温时也能被束缚在电磁阱中，然后通过紫外激光进行冷却。到1981年，离子捕获技术已经精进到可以捕获并检测单个离子，并可以进行前所未有的高精

确光谱分析。

相比之下，原子需要先减速，才能被光和磁场所施加的较弱的力所囚禁。尽管如此，到1985年，比尔·菲利普斯(Bill Phillips)及其同事在马里兰州盖瑟斯堡的美国国家标准局，利用光将钠原子束的速度减至几乎停止，然后将它们囚禁在磁阱中。在此基础上，未来的主要挑战似乎是进行更有效的中性原子捕获，并将冷却过程推向理论极限。这两方面的工作都获得了超出预期的成功，这和贝尔实验室的阿瑟·阿什金(Arthur Ashkin)有密切关系。

使用的原子束仪器是采用有机玻璃窗建造的，无法维持足够低的真空。这些从外部泄漏进来的原子和分子与光束中的原子碰撞时，目标原子被踢出势阱。在经历了几年的失望结果后，贝尔实验室领导层对此感到不满，并迫使阿什金转变了研究方向。

就在这一时期，一位(自称)“善于攻克困难实验”的年轻研究员进入贝尔实验室。他的名字叫朱棣文(Steve Chu)，对阿什金的想法很感兴趣。他们共同建造了适合原子冷却和捕获的超高真空系统，并增加了一个通过快速扫描激光频率来减速钠原子的装置，以补偿速度变化带来的多普勒频移。后来这一技术被称为“啁啾冷却”。

这时，朱棣文建议使用三对垂直的对射激光来照射原子以预冷却原子，所有激光都调谐到略低于原子跃迁频率的频率。这种方案同时在三个维度上提供冷却力，无论原子以哪种方式移动，它们都会感受到一个与其运动方向相反的力。由于与游泳者在粘性液体中的困境相似，朱棣文将其称为“光学黏团”。

贝尔实验室团队于1985年从啁啾冷却的装置中收集到数千个原子，演示了光学黏团，将原子固定在光束重叠区域中大约十分之一秒(在原子物理学中可算是永恒)。在光学黏团区域，原子不断吸收和发射冷却激光，因此它们看起来像一团弥漫的发光云。发光的总量可以用来测量原子的数量。

贝尔实验室

我们最后一次见到阿什金是1970年，当时他刚刚开发出“光镊”技术，将近50年后他因此获得了诺贝尔物理学奖。到1970年代后期，他与贝尔实验室的同事一起开展了原子束的实验工作。通过将激光与原子束重叠，阿什金等证实可以通过调节激光频率使原子束聚焦或者发散。阿什金想用这种效应实现“全光学”捕获原子(即不使用菲利普斯小组的磁场囚禁方案)。不幸的是，因为当时

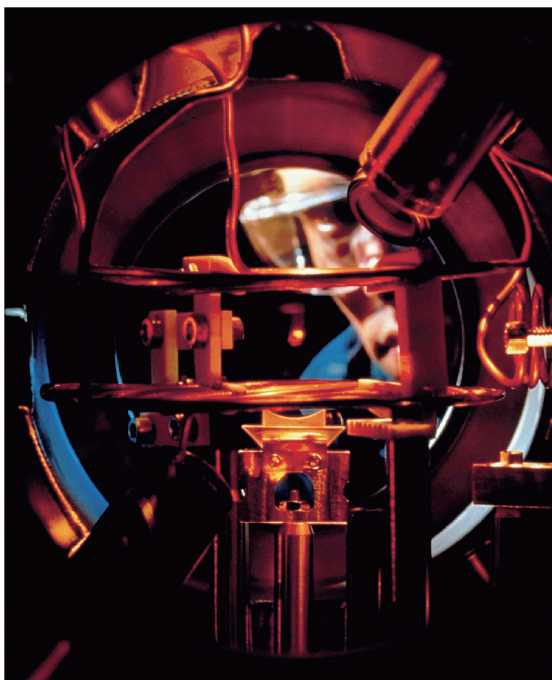


图1 照片拍摄于1980年代后期，美国国家标准局的菲利普斯小组在六束交叉的激光区域观测到钠原子云。菲利普斯因为对激光冷却研究的贡献分享了1997年诺贝尔物理学奖

阿什金、朱棣文和他们的合作者还估计了原子的温度。他们通过短时间关断，然后重新打开激光，测量光学黏团中剩余原子数比例来估算温度。在光关断期间，原子云会膨胀，一些原子会因为膨胀而逃离光学黏团区域。利用这个逃逸率，能够计算原子的温度：大约240微开尔文——正好符合激光冷却钠原子的理论预期最小值。

尽管具有很强的黏性，光学黏团并不是势阱。虽然它减慢了原子的速度，但一旦原子漂移到激光束的边缘，他们还是可以逃脱。相比之下，势阱提供位置依赖的力，将原子推回中心区域。

构建势阱最简单的方法是使用强聚焦的激光束，类似于阿什金开发的用于捕获微观物体的光镊。虽然激光焦点区域的体积只占光学黏团的一小部分，但是仍有大量原子可以通过黏团中原子的随机扩散在这样的势阱中聚集。当他们向黏团中添加一束单独的捕获激光时，结果令人鼓舞：弥散的光学黏团云中出现了一个小亮点，代表数百个原子被捕获。然而进一步发展带来了技术挑战。激光导致的原子能级的移动一方面使得光阱捕获成为可能，另一方面却阻碍冷却过程：当捕获激光将原子基态的能量向下移动时，它改变了冷却激光的等效失谐。使用另一束激光或者交替使用冷却和捕获激光可以增加捕获的原子数，但代价是增加了系统的复杂性。为了取得进一步的进展，物理学家需要更冷的原子或更好的势阱。

法兰西的建议

巴黎高等师范学院的科恩-塔诺季(Claude Cohen-Tannoudji)和他的团队主要从理论方面研究激光冷却问题。当时 Jean Dalibard 是该小组

的新进博士，他记得他们曾研究过阿什金和 Jim Gordon 的理论分析(“一篇精彩的论文”)以及苏联二人组(Vladilen Letokhov 和 Vladimir Minogin, 还有 Boris D Pavlik)于1977年得出的激光冷却可达到的冷却极限温度。

这个极限温度称为多普勒冷却极限，它源于原子吸收冷却光后重新发射光子时发生的随机“踢动”。Dalibard 很好奇这个“限制”到底有多严格，并寻找尽可能让原子“处于黑暗”的方法。为此，他使用了标准多普勒冷却理论未考虑的原子性质：真实原子态不是单一能态，而是很多具有相同能量但不同角动量的子能级集合。这些不同的子能级或动量状态会在磁场存在时改变能量(塞曼效应)。另一个复杂的因素是激光的偏振决定了哪些子能级将吸收光子，其中一种偏振增加原子角动量，而另一种则减少。

在该理论中，Dalibard 将这些子能级与磁场结合起来，激光等效失谐依赖于原子的位置。因此，原子只能在失谐、多普勒频移和塞曼频移组合恰到好处的特定位置吸收特定的激光。Dalibard 希望通过这种方式限制原子吸收光的能力，认为这可能会降低它们的极限温度。在他计算出否定的结果后，他就放弃了这个想法。“我看到这是一个势阱，但我不是在寻找势阱，而是在寻找亚多普勒冷却，”他解释道。

如果不是麻省理工学院的物理学家 Dave Pritchard 在1986年访问了巴黎小组，事情可能就到此为止



图2 1980年代，美国的朱棣文(左)和法国的 Claude Cohen-Gannoudji (右)从实验和理论角度解决了亚多普勒冷却问题

了。在访问期间，他发表了关于生产更大体积势阱想法的演讲，最后他说欢迎其他更好的建议。

“我去找 Dave，我说‘好吧，我有一个想法，但不太确定它是否更好，但它确实与你的不同，’” Dalibard 回忆道。Pritchard 将 Dalibard 的想法带回美国，并于1987年和朱棣文建造了第一个磁光阱(MOT)。Dalibard 被邀请担任最终论文的共同作者，但他只是高兴地接受了在致谢中的认可。

MOT 对于激光冷却的发展具有极其重要的意义。它是一种相对简单的装置，只需要单一激光频率和相对较弱的磁场即可产生强囚禁。更重要的是它的容量，朱棣文和阿什金的第一个全光势阱容纳了数百个原子，菲利普斯的第一个磁势阱容纳了数千个原子，但第一个磁光阱容纳了千万量级的原子。随着科罗拉多大学威曼(Carl Wieman)推出廉价的二极管激光器，MOT 的出现引发了全球研究激光冷却的团体数量的迅速增长，研究的步伐大大加快。

盖瑟斯堡的意外发现

当 Pritchard 和朱棣文建造第一个 MOT 时，马里兰州盖瑟斯堡的菲

利普斯和他的同事在光学黏团研究中遇到了一个极不寻常的问题。由于光学黏团的效果太好了，菲利普斯小组决定开展更系统的研究，包括原子团温度的测量。贝尔实验室小组开发的“释放—重新捕获”方法具有相对较大的不确定性，因此菲利普斯小组尝试了一种新方法。他们在光学黏团附近放置探测光，当光学黏团关闭时，原子就会飞走。它们到达探测区域所需的时间可以反映它们的速度，从而测量它们的温度。

由于空间限制，最初探测光被放置在黏团区域稍上方。对于以多普勒极限速度运动的原子来说，应该可以看到信号。但是当他们尝试这个实验时，没有原子到达探测器。最终，他们将探测器位置转移到黏团下方，这时他们看到了一个漂亮的信号。温度比预想的低很多。这引出了一个问题：多普勒冷却极限为240微开尔文，但这种“飞行时间”法测量显示的温度为40微开尔文。

这个结果似乎违反了墨菲定律，“凡是有可能出错的事情就一定会出错”，所以他们并不愿意立即接受。他们使用几种不同的技术重新测量温度，包括改进的“释放—重新捕获”技术，但他们不断得到相同的结果：原子比理论推测的可能温度低得多。

1988年初，菲利普斯联系了激光冷却研究的其他团体，请求他们检查自己实验得到的温度。朱棣文和Wieman很快证实了这个令人惊讶的结果：光学黏团不仅可以冷却原子，而且比理论预言的效果更好。

越过山丘

巴黎小组没有进行实验，但Dalibard和Cohen-Tannoudji通过追

踪Dalibard早期发展MOT理论时使用的特征，即多个原子内态，从理论上解决了这个问题。钠的基态有5个具有相同能量的子能级，原子在这些状态之间的分布取决于光的强度和偏振。6个反向传播光束的组合产生了复杂的偏振分布，因为光束在光学黏团内的不同位置以不同的方式组合。原子不断地被光学泵浦成不同的分布，延长冷却过程并允许更低的温度。

到1988年夏天，Dalibard和Cohen-Tannoudji设计了一个优美的模型来解释亚多普勒冷却。（朱棣文独立地得出了类似的结果，他回忆是在欧洲两次会议之间的火车上得出的。）他们考虑了一个只有两个基态子能级的简化原子，传统上标记为 $-1/2$ 和 $+1/2$ ，由传播的两束相互垂直的线偏振光照射，从而在空间形成周期性的光频移。当 $-1/2$ 态原子向高能量区域移动时，原子被减慢，就像球滚上山一样。而到达“山顶”时，光泵浦将原子变到 $+1/2$ 态，又处于势能的底部，原子继续爬上“山丘”失去能量，速度变慢，如此循环。

这种通过不断爬“山”而失去能量的过程有一个生动的名字：Dalibard和Cohen-Tannoudji将其称为“西西弗斯冷却”，源自希腊神话中的国王，他被判永远将一块巨石推上山，结果却发生了岩石滑落，离开并返回底部。光学黏团中的原子处于类似的困境，总是爬山并失去能量，只是需要将它们光学泵浦到底部并迫使它们重新开始。

西西弗斯冷却理论对最低温度以及它们如何依赖激光失谐和磁场做出了具体预测。这些预测很快得到了世界各地实验室的证实。1989年秋，*Journal of the Optical Society*

*of America B*发表了关于激光冷却的特刊，其中包含菲利普斯小组的实验结果、巴黎的西西弗斯理论以及朱棣文小组的实验和理论相结合的论文。在接下来十年时间里，这期特刊被学生视为激光冷却的权威解释，Cohen-Tannoudji、朱棣文和菲利普斯分享了1997年诺贝尔物理学奖。

在极限情况下，西西弗斯效应可以将原子冷却到这样一个程度，原子不再有足够的能量来爬上一座“山”，而是被限制在单一极化的一个微小区域内。这种限制与捕获离子一样严格，也使得激光冷却的两个分支彼此对应。到20世纪90年代初，被捕获的离子和中性原子都可以被冷却到其量子性质变得显著的状态：势阱中的单个离子，或西西弗斯冷却创建的“阱”中的原子，只能存在某些离散的能量状态。这些离散状态很快就在这两个系统都测量到了。如今，它们已成为基于原子和离子的量子计算的重要组成部分。

另一个有趣的研究方向涉及势阱本身。这些势阱是在光束干涉时形成的，并且自然地以激光的半波长为间距周期性出现在大型阵列中。这些所谓的“光晶格”的周期性性质模拟了固体物质的微观结构，其中原子在晶格中扮演着电子的角色。这种相似性使得被捕获的超冷原子成为探索超导等凝聚态物理现象的有用平台。

然而，要真正探索冷原子的超导性，晶格中必须装载比西西弗斯冷却所能达到的更高密度和更低温度的原子。实现这一目标将需要另一套新的工具和技术，这不仅将创造已知系统的类似物，而且将创造全新物态，从而揭开新的篇章。