

来自超快激光的寒冷

(北京大学 王树峰 编译自 John F. Barry, *Physics*, October 10, 2016)

某些类型的原子无法通过传统方法冷却与捕获，超快激光提供了希望。

观察、利用和验证量子力学现象是大多数现代物理学实验的中心，冷原子为实现这些研究提供了极佳的实验平台。传统的激光冷却方式是这样的：激光束从六个不同的方向汇聚，激光的频率略低于选定的电子激发态。频率的失谐导致粒子会优先从与其速度方向相反的光束中吸收光子，光子的动量由此就被传递给粒子，从而使速度降低。由于粒子的动量可以远大于单个光子的动量，这个过程就像是不断地用网球来打击一只保龄球使之减速。采用具有四极结构的磁场并恰当地选择光的偏振可以使冷却后的粒子被磁光陷阱束缚。

迄今为止，只有一部分元素实现了激光冷却：所有的碱金属，一些碱土金属、过渡金属(铬、铁、银、锌、镉和汞)、贫金属(铝、镓和铟)、镧系元素(镧、铈、铕、铥和镱)，以及一些惰性气体。但有机生命的构件不在这个名单上，比如碳、氢、氮和氧。虽然这些元素构成了96%的人体，但它们参与的化学反应并没有在量子力学的层面上得到很好的理解。

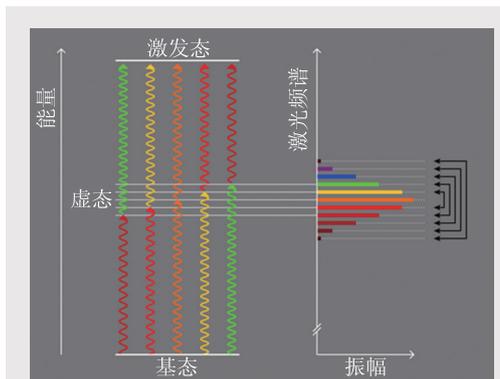
氢原子的激光冷却对研究产生的影响最为直接。作为宇宙中丰度最高的元素，温度为几十开尔文的氢在大多数天体物理学过程中起着核心作用，包括恒星的形成以及星际气体云的演化。因此冷氢原子样品就可以成为研究这些过程的实验平台。而且，如果氢可以被激光冷却，那么反氢原子应当也会很快成

为研究对象，这是因为粒子物理的标准模型预言了二者具有相同的电子跃迁波长。被俘获的反氢原子的光谱可以阐明一系列问题，从宇宙物质—反物质问题，到电荷、宇称、时间反演对称，以及反物质的引力特性。

想要冷却某些种类的原子，需要克服的一个基本障碍是在吸收和辐射这个循环中提供足够强的光，使得粒子在穿过交叉的激光束前就得以冷却并

被俘获。碳、氢、氮和氧原子需要波长短于200 nm的激光，这个波段被称为真空紫外，位于紫外和X射线区之间。要让连续激光光源产生足够的真空紫外光用于传统的激光冷却非常困难，而脉冲激光方法相对容易得多。

Campbell组采用了超快激光(持续2—5 ps)，这种激光包含有一系列频率等间距离散的光。这种光通常称为频率梳，这些分立的频率则称为梳齿。一个梳齿上的光子将原子激发到一个虚电子态能级，另一个梳齿来的光子则继续将其激发到所需的激发态。梳齿彼此成对，成对光子的总能量彼此相等，并略低于激发态的能量。这种能量差确保了粒子倾向于吸收与其运动方向相反的光子对，这与传统的激光冷却方法是类似的。这种方法的革新之处在于利用所有的梳齿共同驱动跃



Campbell和合作者们使用一台能产生超快脉冲的激光器(脉冲宽度约2—5 ps)将一簇铷原子冷却到运动量子基态。这种激光脉冲包含了频率间隔均匀的光，在频谱上看就像“梳齿”。在冷却过程中，频率之和相等并且符合要求的光子对将原子从基态经由中间虚态激发到目标激发态

迁，而其他部分则与传统方法很类似。

虽然他们的研究组研究的是大约一千万个铷原子构成的样品，但这个工作的影响却是明确的：频率梳冷却方法可以用于那些跃迁能量较高而无法使用连续激光冷却的原子。这个实验仍然还面临挑战。虽然研究组获得的最终的温度与传统激光冷却方法相接近，但光子的吸收率低1000倍。因此，这种方法可能需要预冷却最初的热粒子。这个组在对铷原子的研究中采用了这一步骤，随后频率梳的冷却和俘获才起作用。由于对氢(以及反氢)的高度兴趣，下一步的挑战会是演示氢的多种预冷却方法，并且要与这里展示的技术相容。

更多内容详见：A. M. Jayich et al. *Phys. Rev. X*, 2016, 6: 041004.