

极性分子量子气体

超冷极性分子的研究是当前原子分子和光物理研究的前沿之一。由于分子是组成物质材料的基本单元,所以这一前沿研究会很自然地与化学、量子信息、凝聚态物理和天体物理密切地交叉,并且有可能带来新的技术突破。操控分子间的相互作用也因此成为几代物理学家长期探索的重要科学问题。在过去的30年间,研究人员已经成功地将原子冷却到极低温度,并发现了很多非常超乎寻常的量子现象。因而,将分子冷却到超低温将带来更多的机遇。

但是,由于分子存在复杂的转动自由度,精细和超精细内部自由度等内部结构,这一过程变得非常困难。图1展示了超冷分子所涉及的不同的能量尺度。可以看出,当分子气体被冷却到极低温度时,它的内部自由度的激发能比它的动能要大近10个数量级。因此,精密地控制分子的内部量子态以及内部态和质心运动之间的能量交换对于实验的成功极其重要。这也使得冷却分子的研究非常困难。然而,另一方面,也正是由于这些丰富的内部结构,一旦我们成功地制备出超冷极性分子气体,它会给科学研究带来更多的机遇。首先,对于分子的实验研究可以扩展对于量子体系的操控和精密测量。利用其丰富的内部结构,可以检验诸如基本常数,对称性和宇称,标准模型的各种扩展等很基本的物理问题;再则,极性分子气体提供了一类新的量子多体系统,它具有很强的各向异性的偶极相互作用,并且可以很容易地通过外电场来调节相互作用;第三,简并分子气体还使得研究极低温的化学反应成为可能。本文将介绍近期在制备、操控和冷却分子气体方面的技术突破,以及有关量子简并区域内的分子气体的碰撞性质和化学反应方面的初步实验结果。

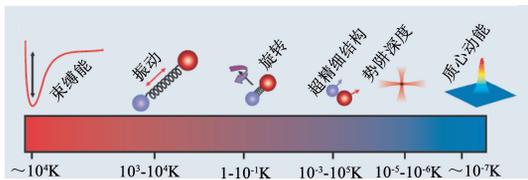


图1 分子的众多自由度及其相应的能量尺度。分子复杂的内部结构研究为精密测量、量子科学和超冷化学提供了机遇和挑战

1 冷却分子

在过去的几个世纪里,研究者发展了几种不同的方法试图获得超冷分子气体。例如,将分子和超冷原子气体相接触来达到冷却的目的;利用分子束技术来减速分子气体;利用激光冷却的思想来冷却分子等。尽管目前这些技术所获得的冷分子气体已经在高分辨率谱测量等方面有了应用,但是,目前所能达到的相空间密度只有 10^{-12} ,距离量子简并所要求的相空间密度达到1这个量级还差得很远。

另一种思路是利用激光驱动的光跃迁将超冷原子转化为分子。但是,利用这种方法使原子转化为基态分子的效率很低,而如果转化为激发态的分子,这些激发态分子会进一步通过自发辐射衰减到能量更低的随机分布的各种分子态上。

因此,这就需要完全相干地将原子转化为基态分子。近来

超冷原子和精密激光技术手段的发展使之成为可能。首先,制备由两种不同原子组成的简并量子气体,利用 Feshbach 共振技术,可以使它们都形成束缚能很小的束缚态。然后,利用位相锁定的一对拉曼光(如图2所示),通过一个激发态将弱束缚的分子态相干地转移到处于基态的分子态。利用这一技术,实验上已经成功地制备了处于几百纳开(nK)的 KRb 分子气体,它的相空间密度大约为0.1。目前,该极性分子气体的温度已经达到1.5倍的费米温度,量子简并已经非常接近了。

2 量子统计在超冷分子碰撞和化学反应中的作用

超精细结构通常对于普通的化学反应是完全不重要的,但是在超冷分子气体中,相互碰撞的能量常常会远小于超精细自旋劈裂的能量。而且,即便这些内部自由度和分子的外部运动的耦合非常弱,但是由于量子统计的作用,内部自由度也会对超冷碰撞起到非常重要的作用。在 KRb 分子的实验中,它的内部状态是可以很精确地控制。图2中的光学过程可以保证分子处于它36个不同的内部超精细态中的任何一个,而且可以进一步通过微波来操控它们占据2个或多个内部状态。

超冷分子之间的碰撞通常用两个碰撞分子的相对运动的分波来描写。通常只有角动量最低的一个分波通道起主要作用。对于 KRb 这种费米型的分子来说,如果所有的分子处于同一个内部状态,空间部分的运动就需要反对称化,因此最低的分波是 p 波。p 波散射有一个很高的中心势垒,分子只有穿过这个势垒才能发生反应。因而这时候反应的几率随温度的降低而线性减小。而如果分子被制备在几个不同的内部态的混合态上,那么,它们的相对运动就不需要进行反对称化。这样,总角动量为零的 s 波碰撞就会发生,这个分波的散射没有中心势垒,所以反应的几率会大很多,而且和温度无关。这一不同点已经在最近的实验中观测到。通过操控分子的核自旋状态,使得分子从只占据1个内部态到占据2个内部态,实验上可以看到超冷化学反应几率的显著变化。

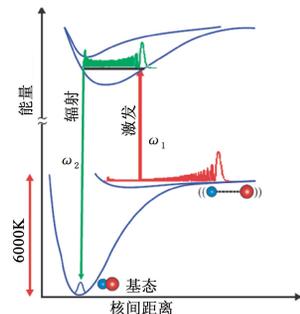


图2 目前实现超冷极性分子的最先进的方法。首先利用 Feshbach 共振技术产生非常弱束缚的分子态,然后用两束位相相干的激光,将它们的频率差调到和分子的束缚能耦合,利用一个激发态分子作为中间态,将弱束缚的分子相干转运到基态分子态

3 偶极相互作用

极性分子气体独特而有趣的性质还来自于可以用电场操控的偶极相互作用。虽然现在实验上研究的分子气体还没有进入量子简并区域,但偶极相互作用已经表现出显著的量

子特性.

在 KRb 分子的实验中,如果两个分子沿着偶极矩的方向碰撞,它们之间的相互作用就是吸引的,这将降低上面提到的 p 波中心势垒,甚至使得这个势垒完全消失.这使得化学反应的速率增加了 100 倍.如果将这些偶极分子束缚在一个准二维的平面中,当偶极矩垂直于平面时,这样就会使沿着偶极子方向的碰撞受到抑制,实验上观测到化学反应的速率也会受到抑制.

4 展望

超冷分子是一个能引起人们多方面研究兴趣的、交叉的新兴研究方向.它展示了我们对于复杂系统的精密操控和测量的能力越来越强,既有很强的基础研究价值,也有应用的前景.过去几年来,随着制备冷分子和超冷分子技术的突飞猛进,在可以预见的不久的将来,我们将实现分子气体的量子简

并.在这之后,下一步就是研究该系统的多体行为和超冷化学.将极性分子装载在三维光晶格中,偶极分子之间的长程相互作用将使得处在不同格点上的粒子之间也有相互作用,这就非常不同于光晶格中的原子气体,在原子气体中只有处于同一格点的粒子才有相互作用;利用光晶格还可以实现多层极性分子体系,研究层间相互作用和层内相互作用之间的相互影响;此外,在一维体系中引入长程各向异性相互作用也会带来很多丰富的物理现象.最后,在没有外加光晶格的情况下,极性分子是否会由于它们之间有很强的长程排斥相互作用而自发形成晶格结构,这也是一个非常有趣的研究课题.

(清华大学高等研究院 翟荟 编译自 Deborah S. Jin, Jun Ye. *Physics Today*, 2011, 5: 27, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)