

分子玻色凝聚体初露曙光*

韩殿君

(美国加州大学伯克利分校 美国伯克利 AC 94720 - 7300)

摘要 德州大学奥斯汀分校(University of Texas at Austin)的实验小组最近以受激拉曼跃迁的方法将玻色-爱因斯坦凝聚体(Bose-Einstein condensate)中的铷原子转换为单一内部能态,温度约为100nK的铷分子(Rb_2)^[1].美国国家标准局(NIST)的资深物理学家 Paul Julienne 说,这可能是宇宙中最冷的分子.由于用传统的激光冷却的方式产生超冷分子有一定的难度,奥斯汀小组的实验为此另辟一条新路,并为分子凝聚体(molecular condensate)的诞生跨出了第一步.

关键词 分子凝聚体,玻色-爱因斯坦凝聚,受激拉曼跃迁

THE FIRST STEP TOWARDS REALIZATION OF MOLECULAR CONDENSATE

HAN Dian Jun

(Department of Physics, University of California at Berkeley, Berkeley AC 94720-7300)

Abstract A group at the University of Texas at Austin has recently created Rb_2 molecules from a Rubidium-87 Bose-Einstein condensate with two-photon stimulated Raman transitions. The molecules are in a single rovibrational level and have a temperature on the order of 100nK. These might be the coldest molecules in the universe, as says Paul Julienne, a senior atomic physicist at NIST. This method provides an alternative route for formation of ultra-cold molecules which are still not achievable with the traditional laser cooling and trapping techniques, and may lead to the first realization of molecular Bose-Einstein condensate.

Key words molecular condensate, Bose-Einstein condensate, stimulated Raman transition

激光冷却(laser cooling)中性原子的研究自80年代中期以来蓬勃发展,以致原子科学家于1995年形成稀薄铷原子气体的玻色-爱因斯坦凝聚^[2].借助激光冷却和蒸发冷却(evaporative cooling),碱金属如锂,钠以及氢原子气体先后达到量子简并的领域(quantum degenerate regime).此类凝聚体温度分布为数 μK 到数百nK的超冷原子,如今已可在全世界许多原子与光学实验室中产生.

相较于冷原子,冷分子的产生则是困难重重.原因是激光冷却高度依赖于所谓二能级的重复跃迁(cycling transition).如此,方能形成光子的多次吸收,因而致冷.由于原子的内部结构远较分子单纯,极易满足这一要求.反观分子,即使是最简单的双原子分子,除了电子的能级外还有振动与转动能级.上述重复跃迁的条件极不容易以一或两个激光光束加以满足,以致于直接用激光来冷却分子的技术一直

未有突破.虽然如此,各种替代方式以试图将分子冷却的研究仍不断进行.超低温的冷分子可增进频率标准的精度,可应用于电子的电偶极矩(electric dipole moment)的精密测量、精密光谱学、冷原子与冷分子、或冷分子与冷分子之间的量子碰撞行为、量子集体效应(quantum collective effects)和分子光学(molecule optics)等相关研究.

作者曾在其中工作过的奥斯汀小组的实验方式是采用受激拉曼跃迁过程(stimulated Raman transition),如图1所示.将两束激光入射到由TOP磁阱(magnetic TOP trap)所囚禁的铷原子玻色凝聚体中,两束激光的频率分别为 ω_1, ω_2 ,相应的波矢量分别为 $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$.在凝聚体中,当两个处于非束缚态的铷原子依其间的相互作用位能 $V(R)$ 而靠近时,吸收激光

* 2000 - 03 - 31 收到初稿,2000 - 05 - 19 修回

场 1 的一个光子,同时放出一个光子给激光场 2.两个铷原子经过此一受激拉曼跃迁而形成一束缚态的分子,其束缚能为 ϵ .由于此分子处于单一的转-振动能级(ro - vibration level),当 $\hbar(\omega_1 - \omega_2) = \epsilon$ 时,即满足所谓共振条件(resonance condition).除此之外,这一过程必须同时满足动量守恒.由光子加诸于分子的反冲动量(recoil momentum)为 $\hbar(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2)$.在此实验中,该转移值几乎为零,原因是两束激光入射方向相同,并且频差极小所致.由于位于凝聚体内的原子几乎是静止的,因此,其中形成的分子也可以说几乎是静止的,其温度依据推算约为 100nK.因为当两束激光的频率差正好满足共振条件时,由拉曼跃迁形成的分子数达到最大值.因而借助扫描两束激光的频率差便可以得到拉曼跃迁的频谱.

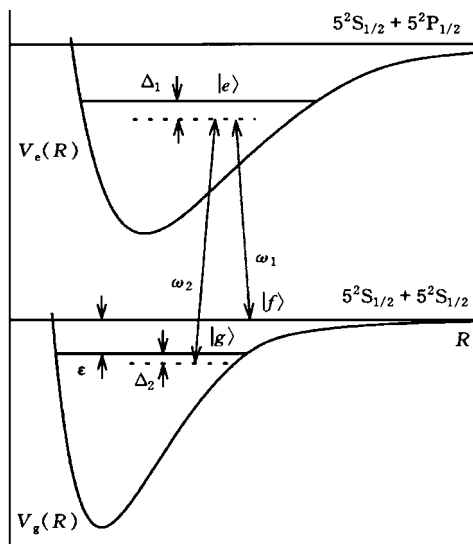


图 1 自由态原子与束缚态分子间的双光子拉曼跃迁

(激光场 1 的频率为 ω_1 ,激光场 2 的频率为 ω_2 .拉曼跃迁将原子从自由态激发转换为束缚态的分子.由于激光束的频率远离原子与受激分子或束缚态分子与受激态分子间的单光子的共振频率,因此,双光子拉曼跃迁过程为相干过程)

典型的实验结果如图 2 所示.结果表明,在凝聚体中,原子自由态 - 分子束缚能的拉曼跃迁线宽(free - bound transition line width)约为 1.5kHz.类似的测量曾被用于非凝聚体的冷原子的双光子光缔合实验(two-photon photoassociation).由于该类实验中原子的温度约为数百 μK ,其动能所造成拉曼谱线的多普勒加宽(Doppler broadening)约为凝聚体的 10000 倍.正如我们所知,光缔合实验的测量结果曾提供非常精确的冷原子碰撞参数,例如 s - 波散射长度(s - wave scattering length)的大小和符号,并由

此使我们更加了解凝聚体的一些特性.相较于此,奥斯汀小组的实验更将我们对冷原子的碰撞参数测定推向前所未有的准确度,主要原因也就是凝聚体的超低温.由于测量精度的改进,也使我们对铷分子的这些转动 - 振动能态的束缚能首次进行如此精确的测量.这不但使我们对铷原子间二体碰撞的长程(long range)势能有更准确的了解之外,也同时让我们能够对相对论中迟滞效应(retardation effect)对长程势能的影响作更进一步的检验.

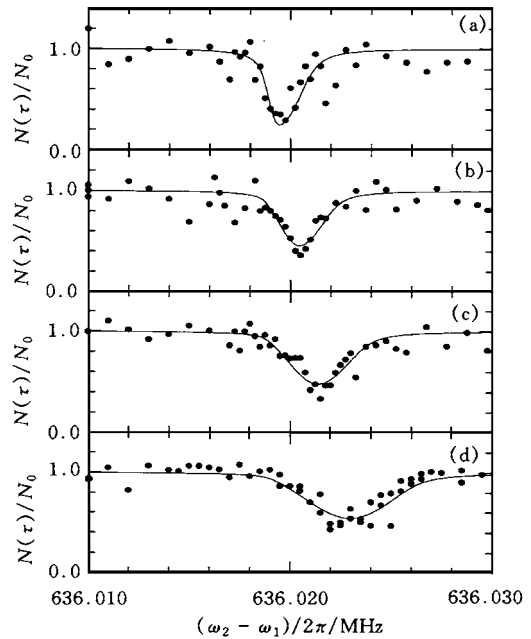


图 2 自由态原子(Rb - Rb)与束缚态分子(Rb₂)之间的拉曼跃迁光谱

[(a)到(d)为原子凝聚体密度由低至高所显示的频率位移加宽:
(a) $N_0 = 0.77 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$; (b) $N_0 = 1.22 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$; (c) $N_0 = 1.75 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$; (d) $N_0 = 2.60 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$]

除此之外,该实验的另一项突破是首次测量了铷分子和铷原子凝聚体之间的相互作用亦即其散射长度.如果我们仔细分析图 2 所显示的实验结果可以发现,当凝聚体的空间密度不同时,拉曼跃迁谱线的中心频率不仅向一个方向偏移外,其线宽亦随密度增加而增加.造成此现象的主要原因是由于分子与凝聚体的相互作用所引起.当凝聚体的原子数足够多,以致它的动能远小于其平均场能(mean - field energy)时,凝聚体便进入 Thomas - Fermi 区.在此情况下,凝聚体的空间分布为反抛物线,其平均场能与大小和位置的关系随此曲线变化.同时凝聚体的位能也恰为一抛物线,亦即是 TOP 阱的势能.因此,凝聚体原子在 TOP 阱内的总能量(势能加平均场能)与位置无关.而对于分子,虽然它的势能仍呈抛

物线形状(也就是原子的两倍),其平均场能(虽然与位置的关系也是一个反抛物线)的大小却未知.因此,分子在 TOP 阱内的总能量与位置有关.同时,铷分子的转动-振动能态的寿命远短于 TOP 阱的振动周期.拉曼跃迁谱线位移直接反映出分子的空间分布以及分子与凝聚体原子的作用.而拉曼谱线的加宽,部分原因是由于分子与凝聚体原子之间的非弹性碰撞而来.此非弹性碰撞一旦发生,将改变原子或分子的内部能级,并将其内能转为动能,使其逃离 TOP 阱的束缚.拉曼谱线的加宽,显示铷分子的转动-振动能态的寿命的缩短.由此可见,凝聚体的密度越高,拉曼谱线的线宽越宽.奥斯汀小组的实验显示出该特定能级分子与凝聚体的相互作用是一吸引力,也就是说,分子凝聚体的平均场能有增强分子被阱束缚的倾向.谱线加宽数据分析结果也显示铷分子停留在该转动-振动能态的寿命为 0.1—0.45 ms,这与原子凝聚体的寿命相比是相当短的.亦即分子态凝聚体即使形成也将在上述期间内崩塌.

受激的拉曼跃迁过程具有相干性(coherent),因此用这一方式将原子凝聚体激发成分子态凝聚体,原则上是可行的.可预见的限制主要来自分子能级的弛豫(relaxation).相关的研究更表明,因非弹性碰撞所导致的分子能级的弛豫会因分子的束缚能的增

加而大幅度降低.类似 Feshbach 共振^[3]用磁场调制方式相干产生分子态凝聚体的想法最近也被提出.然而,以此方式合成分子的同时,亦将伴随极大的分子振动能级的弛豫,因此造成严重的原子三体结合,使凝聚体崩溃.

分子态凝聚体的研究有很特殊的意义.若干研究也预测分子态与原子态凝聚体虽然为稀薄的气体,然而,其混合系统将呈现液体的特殊性质^[4].同时,利用凝聚体波函数的非线性耦合特性,将分子态与原子凝聚体以相干的方式混合,亦会形成类似孤立波(solitary wave)的原子或分子激光(atom and molecule laser)^[5].混合分子与原子态凝聚体的系统,其中呈现的非线性物质波现象将非常多姿多彩.奥斯汀小组的实验,可以说为分子态凝聚体的产生跨出了成功的第一步.

参 考 文 献

- [1] Wynar R, Freeland R S, Han D J *et al.* Science, 2000, 287: 1016
- [2] Anderson M H, Ensher J R, Matthews M R *et al.* Science, 1995, 269: 198
- [3] Inouye S *et al.* Nature, 1998, 392: 151
- [4] Timmermans E *et al.* Phys. Rev. Lett., 1999, 83: 2691
- [5] Drummond P D, Kheruntsyan R V, He H. Phys. Rev. Lett., 1998, 81: 3055

· 信息服务 ·

英国物理学会北京代表处征稿通知(二)

JOURNAL OF OPTICS B: QUANTUM AND SEMICLASSICAL OPTICS

量子和半经典光学

是英国物理学会出版的英文科学期刊.全球公开发行.每年出版六期.本刊致力于报道需要用量子理论来描述光场或物质的光学现象.涉及的内容包括:量子光学,原子光学,半经典光学,激光理论,需要量子化的非线性光学领域.

研究文章一般不超过 8500 字.快讯一般不超过 3500 字.

本刊免收版面费.

来稿请寄:北京 603 信箱 18 号分箱,邮编 100080

电子邮件: IOPCHINA@APHY.IPHY.AC.CN