

第四讲 冷分子的导引、分束、反射、聚焦与囚禁等操控技术*

邓联忠 夏勇 侯顺永 印建平[†]

(华东师范大学 精密光谱科学与技术国家重点实验室 上海 200062)

2016-10-13收到

[†] email: jpyin@phy.ecnu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20180203

Guiding, splitting, reflecting, focusing and trapping of cold molecules

DENG Lian-Zhong XIA Yong HOU Shun-Yong YIN Jian-Ping[†]

(State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

摘要 近年来,随着冷分子制备技术的不断发展和冷分子温度的不断降低,冷分子操控技术取得了快速发展,并日趋成熟。文章首先介绍了冷分子导引、分束、反射与聚焦等操控的技术方案、实验结果及其最新研究进展。接着重点介绍冷分子静电囚禁、磁囚禁和光学囚禁的各种方案、实验结果及最新进展。最后就冷分子操控技术的应用进行了简单的总结与展望。

关键词 冷分子导引, 分子分束器, 分子束反射, 分子束聚焦, 冷分子囚禁

Abstract In recent years the field of cold molecules has seen much progress, and molecules of ever colder temperatures have been produced. Meanwhile, the techniques of manipulating cold molecules have also been developing and maturing. This paper describes the manipulation of cold molecules with external (electrical, magnetic, or optical) fields, including schemes for their guiding, splitting, reflecting, focusing, and trapping. Experimental results and recent developments are reviewed, ending with a simple conclusion and outlook for possible applications.

Keywords guiding of cold molecules, cold molecular beam splitter, reflection of molecular beams, focusing of molecular beams, trapping of cold molecules

1 引言

众所周知,采用电场、磁场和激光场可实现中性原子的导引、分束、反射、折射(偏转)和聚焦成像等的电、磁、光操纵与控制,并研制成各种原子光学器件,如原子导管、原子分束器、原

子反射镜、原子棱镜和原子透镜等。类似地,采用电场、磁场和激光场也可实现中性分子的导引、分束、反射、折射(偏转)和聚焦成像等的电、磁、光操纵与控制,并研制成各种分子光学器件,如分子导管、分子分束器、分子反射镜、分子棱镜和分子透镜等。

根据直流 Stark 效应、Zeeman 效应和交流 Stark 效应,利用静电场、静磁场和激光场(即电磁场)与极性分子的电偶极矩、顺磁分子的磁偶极

* 国家自然科学基金(批准号: 91536218, 10904037, 10974055, 11034002, 11274114, 11374100, 11347194, 11404151, 61205198)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB921602)资助项目

矩和中性分子的感应电偶极矩之间的相互作用可操纵与控制中性分子的外部自由度。对于中性原子，由于原子运动的电、磁、光操控技术较为简便，而且随着中性原子激光冷却与囚禁技术的不断发展，原子温度可以被冷却至 $1\ \mu\text{K}$ ，甚至一个光子反冲温度($\sim 0.1\ \mu\text{K}$)以下，因而对冷原子或超冷原子的电、磁、光操控技术已相当成熟。由于分子内部复杂的能级结构，使得传统的激光冷却技术无法简单地应用于中性分子的冷却。除了激光冷却外，目前还没有十分有效的冷却技术可应用于中性分子的有效减速与深度冷却，因而化学稳定的极性冷分子的温度目前仅为 $250\ \mu\text{K}$ 。冷分子制备的困难在某种程度上制约了冷分子的操作与控制研究。尽管如此，通过科学工作者的努力，有关中性分子的电、磁、光操控技术在理论和实验研究方面均已取得了重要的进展。本讲重点介绍中性冷分子外场(包括电场、磁场、光场等)操控的基本原理、技术方案、实验结果及其最新进展等。

2 冷分子操控技术、实验结果与最新进展

2.1 冷分子静电导引及其应用

2.1.1 强场搜寻态分子的导引

2000年，德国Scheel小组报道了强场搜寻态分子的静电导引^[1]。实验装置如图1所示，由一根载荷直导线(接地)和一个圆柱形不锈钢管(加负电压)构成。当处于强场搜寻态的分子沿着某一角度进入非均匀静电场时，在垂直于 z 轴的平面内作圆周运动，圆周运动的向心力由电场偶极力提供，而当分子圆周运动引起的离心力与静电场提供的向心力相平衡时，分子将沿着稳定的开普勒轨道作匀速圆周运动。由于轴向速度分量的存在，分子将环绕着电极作螺旋线运动，从而实现强

场搜寻态极性分子的导引，即Kepler导引。他们利用该装置实现了对NaCl、NaBr、NaI三种极性分子的静电导引，导引距离约为40 cm，最高导引效率为0.12%。

此外，交变梯度(alternating-gradient, AG)电场也可用于导引强场搜寻态分子。当分子通过一系列AG聚焦的四极杆时，在一个横向将会被聚焦，而在另一个横向则被散焦。当分子远离传播轴线运动时，让其处在聚焦电场中；当分子靠近传播轴线运动时，让其处在散焦电场中。据此，可以实现强场搜寻态分子的导引。2009年英国M. R. Tarbutt等人采用电场交替变化的四极杆成功实现了强场搜寻态CaF分子的静电导引^[2]。2011年德国Meijer小组利用类似方法实现了对特定转动态大分子 $\text{C}_6\text{H}_5\text{CN}$ 的静电导引^[3]。同年德国M. Mudrich等人采用单根带电导线实现了强场搜寻态 ND_3 分子的Kepler导引^[4]。

2.1.2 弱场搜寻态分子的导引

相对于强场搜寻态分子而言，弱场搜寻态分子的静电导引要容易实现些，而且导引效率也要高得多。从早期的六极杆聚焦与选态^[5-8]，到后来的弯曲静电四极杆对低速分子的筛选^[9, 10]等，发展了各种新颖的分子静电导引技术，包括适用于分子芯片表面的各种导引新方案，分别介绍如下。

2005年我们小组提出了一种实现极性冷分子静电表面导引的新方案，并随后在实验上得到验证^[11]。如图2所示，导引装置由两根在绝缘介质

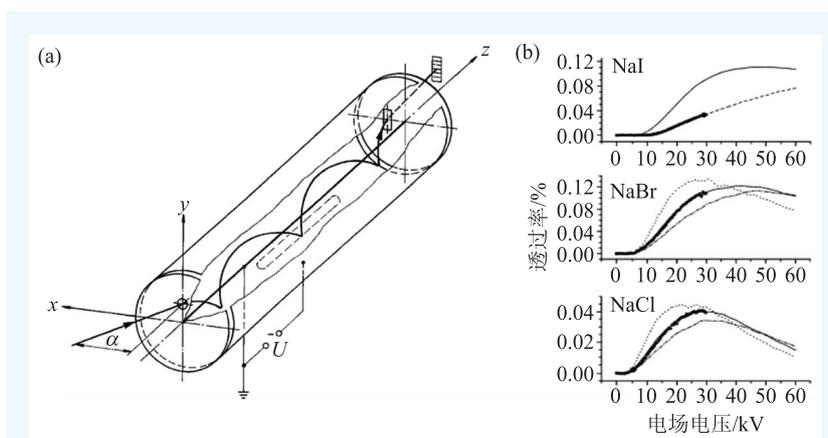


图1 强场搜寻态极性分子Kepler导引的(a)实验装置和(b)结果

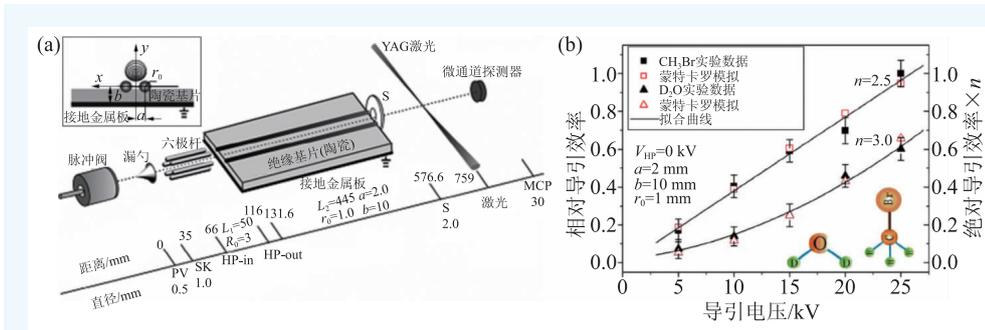


图2 冷分子芯片静电表面导引的(a)实验装置与(b)结果

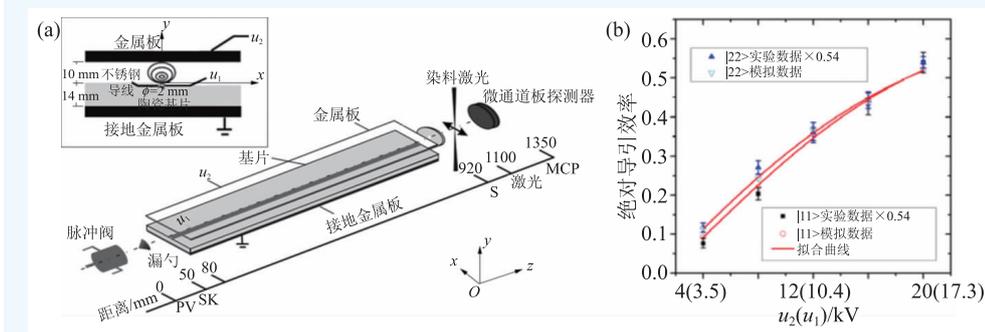


图3 采用单根载荷导线实现极性冷分子静电表面导引的(a)实验装置与(b)结果

表面的平行载荷导体棒和接地金属平板组成。在绝缘介质表面上方形成一个具有中心电场最小值的静电导管，可用来导引弱场搜寻态分子。实验分别以 D_2O 和 CH_3Br 超声分子束(载气为 Ar)为对象，研究了导引效率、被导引分子的横向温度与导体棒所加电压的关系。研究表明：该方案的绝对导引效率可达 30%—40%。为了获得更高的分子导引效率，我们在导体棒上方增加了一块接地的金属板，并进行了相应的实验研究(称为准四极静电导引方案)，获得了约 50% 的导引效率^[12]。

与其他静电导引方案相比，该方案的优点是可以表面化、微型化，并可集成在一块分子芯片上，从而实现冷分子的芯片操控，开展集成分子光学的实验研究。2007 年我们提出了一种采用单根载荷导线实现极性冷分子静电表面导引的新方案^[13]，并于 2013 年完成了该静电表面导引方案的实验验证^[14]，单态导引效率高达 51%。

实验装置如图 3 所示，一根长直导线嵌在绝缘介质中，导线中心与介质表面齐平。导线上方和下方各置一块平行金属板，下金属板紧贴绝缘

介质并接地。当在导线(u_1)和上极板(u_2)加上适当的电压时，在导线上方将形成一个空心的静电管道，如果弱场搜寻态的极性冷分子被耦合进入这一空心静电管道，将会沿着导线方向被有效导引。我们以重氮分子(ND_3)为例，从理论与实验上研究了导引中心位置、被导引冷分子数目及其横向温度与导引电压的依赖关系。同时研究了不同量子态下

导引效率和横向温度与导引电压对 $u_2(u_1)$ 的依赖关系。为便于探测，上方的金属板可采用透明电极材料。

此外，我们还提出了一些其他的冷分子表面导引新方案^[15, 16]，并计算了相应的静电场分布及其对应分子的 Stark 势能，研究了阱深与导引电压的依赖关系，并采用蒙特卡罗方法数值模拟了冷分子导引的动力学过程。

2.2 分子分束与分子分束器

2007 年，我们小组提出了一种采用单根 Y 型载荷导线实现分束比连续可调的分子分束器方案^[17]，开展了冷分子分束动力学过程的蒙特卡罗模拟，并研究了导引分子束横向温度的动力学变化。2011 年，还实验验证了采用单根 Y 型载荷导线和一对平板电极构成的冷分子静电表面分束器方案，实验装置如图 4(a) 所示^[18]。我们研究了分子的分束比与分束器两输出端电压差、分子导引效率与所加电压、分子的分束比与分子束平均速

度等的依赖关系(图4(b))。实验结果表明,我们研制的可控制分束器的分束比可方便地实现从10%到90%的连续调谐,相应的绝对导引效率可达50%左右。显然,这样的可控制高效分子分束器在冷分子物理、集成分子光学与分子芯片、分子物质波干涉及其精密测量科学等领域中有着重要的应用。

分子分束及其分束器是分子静电导引的一个重要应用。此外,分子静电导引技术还可应用于实现冷分子的速度滤波、聚速、存储环囚禁与静电 Stark 减速等。

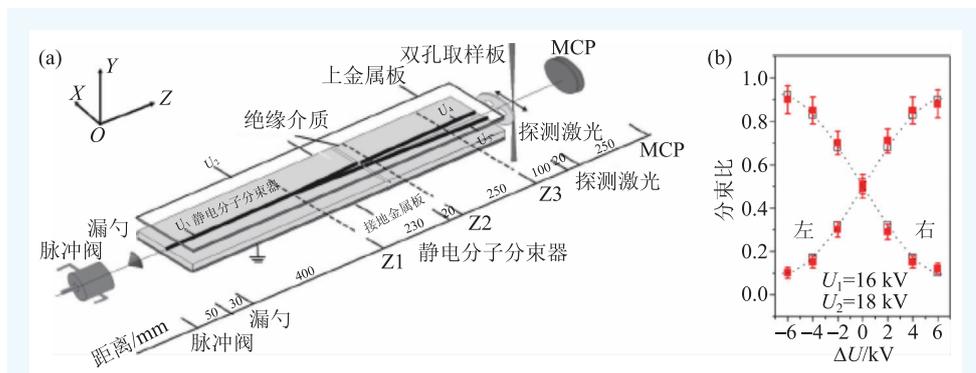


图4 冷分子静电表面分束的(a)实验装置与(b)结果

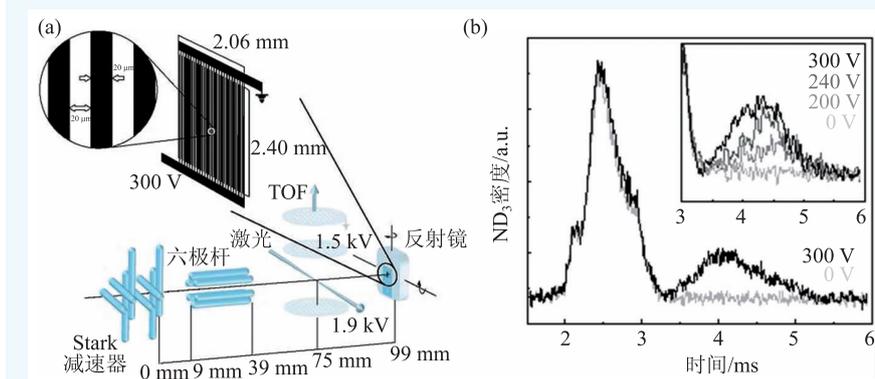


图5 实现 ND₃ 分子束反射的(a)实验装置与(b)结果

2.3 分子束反射与分子反射镜

1992年,澳大利亚 Opat 小组采用周期性排列的静电极产生的静电场实现了极性分子(CH₃Cl)的静电反射^[19]。实验中脉冲 CH₃Cl 分子束以小角度掠入射到静电分子反射镜上,当掠射角为 3 mrad,反射镜电压为 1 kV 时,实验获得分子反射镜的反射效率约为 15%。

2004年,Meijer 小组采用一维平面微电极阵列对经 Stark 减速后的低速 ND₃ 分子进行了冷分子静电反射的实验研究^[20],如图5所示。实验中所用微电极宽度为 20 μm,电极间距为 20 μm。电极材料为金,基底材料为蓝宝石。假设微电极阵列周期为 a ,所加电压为 V ,其表面附近的电场可近似为 $E(z)=4\pi V \times \exp(-2\pi z/a)/a$,这里 z 为离开电极阵列平面的垂直距离。这一电场分布类似于消逝波光场的分布,具有很强的偶极梯度力,可用于弱场搜寻态极性分子的静电反射。当相邻电极间的电压差为 350 V 时,从减速器出来纵向速度为 30 m/s

的 ND₃ 分子可以被偶极梯度力反射回去。

此外,采用红失谐脉冲驻波场、红失谐超高斯激光束、蓝失谐消逝波和蓝失谐半高斯光束也可实现分子束的有效反射^[21-24],并构成新颖的分子光学反射镜。

2.4 分子束偏转、聚焦与分子透镜

利用四极或六极静电场和极性分子电偶极矩间的相互作用,或者非共振激光场与分子感应偶极矩间的相互作用可以实现对分子束的偏转、聚焦,从而构造分子透镜。此外,利用红失谐的聚焦高斯光束也可实现分子束的偏振、聚焦成像,并形成分子透镜。

1997年,H. Stapelfeldt 等报道了利用非共振激光偶极力对分子进行偏转的实验,如图6所示^[25]。一束脉冲的 CS₂ 分子束通过聚焦的红外光束(IR)焦点。实验通过对 CS₂ 分子的多光子电离飞行时间质谱(TOF)探测发现,在非共振光学偶极梯度力

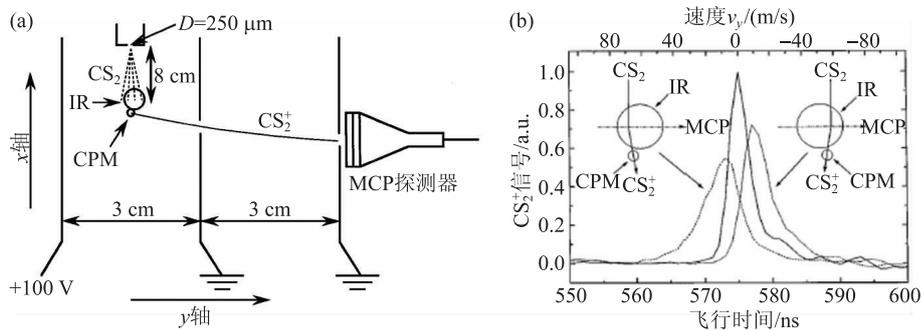


图6 中性分子激光偏转的(a)实验装置与(b)结果

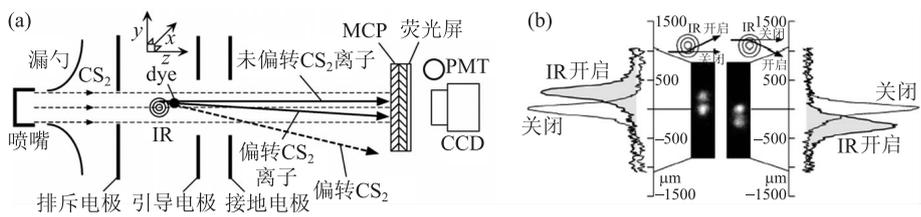


图7 分子束激光偏转、聚焦的(a)实验装置与(b)结果

的作用下, 光束焦点附近的分子横向速度发生了改变, 分子的运动方向产生了偏转。

由图 6(b)可以看出, 当 CS_2 分子束从聚焦 YAG 光束焦斑左边入射时, 分子受到的偶极吸引力使得分子束向右边偏转, TOF 信号如图 6(b)中点线所示; 当 CS_2 分子束从聚焦 YAG 光束焦斑右边入射时, 分子受到的偶极吸引力使得分子束向左边偏转, TOF 信号如图 6(b)中虚线所示; 而当 CS_2 分子束从聚焦 YAG 光束焦斑中间对称入射时, 分子束左右二侧受到的偶极吸引力关于中心轴大小相同方向相反, 因而使得分子束向中间偏转, 形成分子束的聚焦, TOF 信号如图 6(b)中实线所示。

2000 年, 韩国 Zhao 等人采用聚焦的非共振脉冲 YAG 激光对 CS_2 分子束进行了激光聚焦(偏转)研究, 采用速度变换成像技术观测到了透镜对 CS_2 分子的偏转轨迹, 并定量研究了柱面分子透镜参数(最小分子束宽 W , 分子透镜到最小束宽度 W 处的距离 D 和分子透镜焦距 f)与光强的依赖关系, 实验装置和结果如图 7 所示^[26]。从喷嘴出来的超声 CS_2 分子束, 经漏勺(skimmer)后, 穿过聚焦的 YAG 激光脉冲(波长 $1.064 \mu\text{m}$, 图中“IR”

所示), 然后利用脉冲染料激光(图中“dye”所示)对被偏转的分子束进行光电离探测。分子离子信号由带荧光屏的 MCP(微通道板探测器)和 CCD 记录。实验结果证实, 当分子束在 IR 激光聚焦束斑下方通过时, 分子束向上偏转, 而分子束在 IR 激光聚焦束斑上方通过时, 分子束向下偏转。当没有 IR 激光存在时, 分子束方向不变; 而当分子束关于

IR 激光束斑中心对称通过时, 分子束将被聚焦, 此时, 聚焦的 IR 激光束相当于一个分子透镜。

最近, Meijer 小组提出并实验研究一种实现冷分子聚焦的微波分子透镜^[27]。

3 冷分子的囚禁方案

3.1 冷分子的静电囚禁

3.1.1 强场搜寻态分子的静电囚禁

根据麦克斯韦的电磁场理论, 在三维自由空间不存在静电场的最大值。但是在二维或一维空间是可以存在电场的极大值的。利用一个六极电场和一个偶极电场的叠加, 可以在自由空间形成马鞍型的电场分布。在这种电场中, 分子可以沿着一个方向被聚焦, 沿着另一方向被散焦。通过改变四个电极上所加的电压, 实现鞍型电场在两个方向的切换, 从而改变分子聚焦与散焦的方向。如果这一切换过程被周期性的重复, 并且分子接近鞍点时处于散焦电场中, 而当分子离开鞍点时处于聚焦电场中, 就会导致在所有的方向上对分子的平均聚焦效果。这种势阱被称为 AC

阱，既可用于囚禁强场搜寻态的分子，也可用于囚禁弱场搜寻态的分子。图8给出了3种AC阱的几何结构^[28]：(a)直线型AC阱；(b)圆柱型AC阱和(c)三相型AC阱。

2005年，Meijer小组报道了采用圆柱型的AC势阱囚禁强场搜寻态ND₃分子的实验结果^[29]，实验装置如图9所示。

处于弱场搜寻态的ND₃分子经过Stark减速器减速后，利用微波脉冲将其制备到强场搜寻态，然后再打开圆柱型AC阱势将分子囚禁起来，同时被囚禁的还有处于弱场搜寻态的冷分子。随后，Meijer小组还成功地将处于强场搜寻态的ND₃分子囚禁在一个直线型AC阱中^[30]。该阱同样具有两种互补的马鞍型电场结构，通过切换两种电场模式，来实现分子的囚禁。该势阱的优点是它的几何结构是开放的，允许激光束探测并操控阱中的冷分子，如图8(a)所示。此外，由于它的结构是直线型的，因此可以将其放置在离减速器非常近的位置，直接从减速器后面装载分子，而不需要附加的装载单元。

3.1.2 弱场搜寻态分子的静电囚禁

由于麦克斯韦的电磁场理论允许在三维自由空间存在静电场的最小值，因此弱场搜寻态分子的静电囚禁要相对容易得多。2000年，Meijer小组成功地将减速后的ND₃分子囚禁在一个静电四极阱中^[31]。势阱横截面、空间电场强度等高线分布和ND₃分子Stark势能分布如图10所示。在装载过程中，低速分子向着势阱中心运动，Stark势能逐渐增加，运动的分子处于“爬坡”状态，速度越来越低，如图10(a)所示。当分子运动到势阱中心时，改变电极电压，势阱切换到囚禁状态，如图10(b)所示。实验结果表明，势阱中被囚禁分子的密度约为10⁷/cm³，体积约为0.25 cm³，势阱中分子温度约为25 mK。随后几年中，他们又分别将OH^[32]、亚稳态的CO^[33]以及NH^[34]囚禁在类似的势阱中。

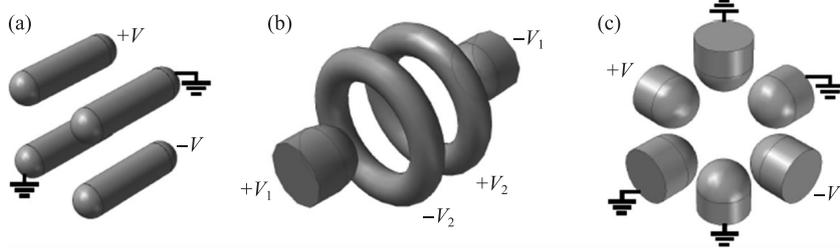


图8 3种AC阱的几何结构 (a)直线型AC阱；(b)圆柱型AC阱；(c)三相型AC阱

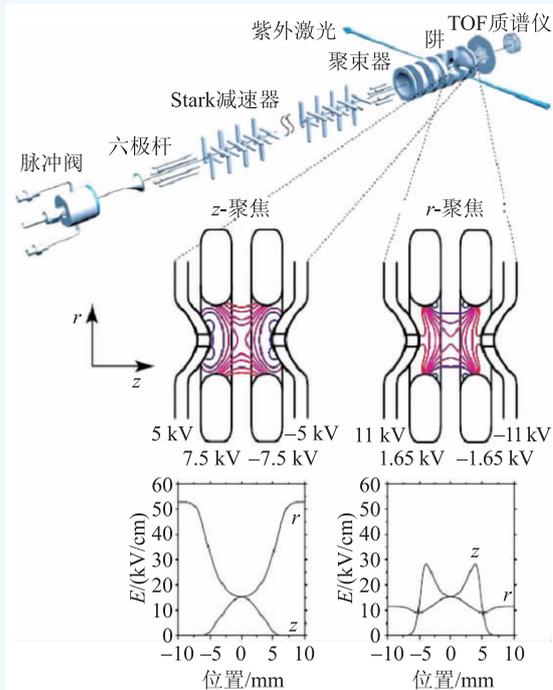


图9 强场搜寻态ND₃分子的静电囚禁方案

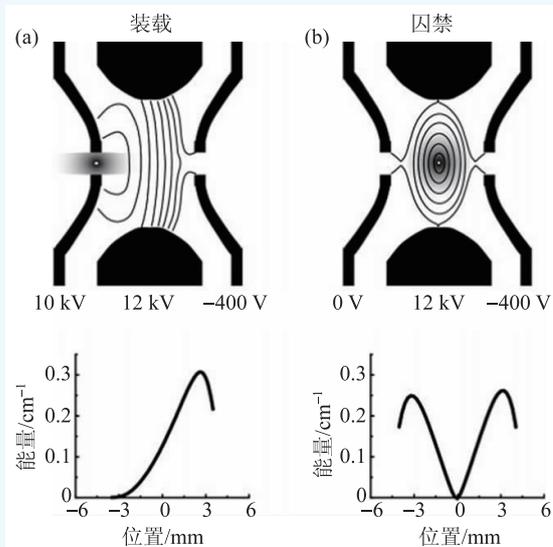


图10 弱场搜寻态冷分子的静电四极阱囚禁 (a)装载过程；(b)囚禁过程

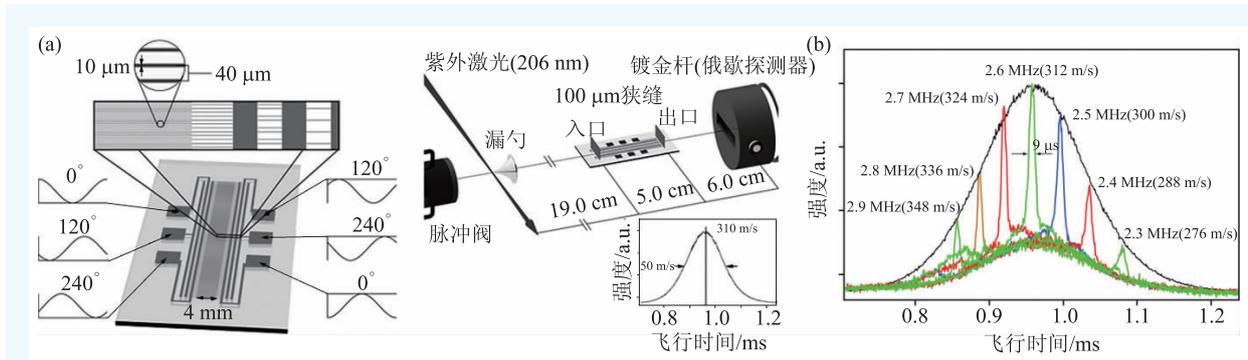


图11 冷分子静电表面囚禁的(a)实验方案与(b)结果

2008年, Meijer小组提出并实验研究了一种超声分子束的静电表面囚禁(运动势阱)与短距离传输方案^[35], 实验装置如图11所示。在基板上刻蚀了1200个平行电极, 每个电极直径 $10\ \mu\text{m}$, 相邻电极中心间距 $40\ \mu\text{m}$ 。在电极表面上方形成的电场分布是由电极上加的约MHz量级的正弦电压产生的, 这些电压是通过平行电极边上的六组大电极提供的。实验上所用的脉冲超声CO分子束的平均速度为 $310\ \text{m/s}$ 。通过漏勺的分子束经过一个狭缝进入长为 $5\ \text{cm}$ 的芯片囚禁区域。分子被囚禁在约 $20\ \text{mm}$ 长管状的运动静电晶格中, 相对静止在分子芯片的表面。被囚禁的CO分子可被运动的晶格电场加速到探测区域进行探测。

2005年, Rempe小组利用5个环形的电极和两个球形电极构成一个可连续装载分子的静电阱^[36]。通过在相邻的电极上加载不同极性的电压, 产生一个适合囚禁弱场搜寻态分子的静电阱。利用一个弯曲的静电四极杆将连续射流束中的低速分子导引、装载到势阱中。冷分子在势阱多次反射振荡, 直到找到出口为止。该势阱的优势是可以连续不断地将冷分子装载到势阱中, 从而提高阱中的分子数密度。实验证明, 被囚禁的 ND_3 分子密度可达 $10^8\ \text{cm}^{-3}$ 。

2007年, J. Kleinert等人采用4个半径均为 $8\ \text{mm}$ 的同心圆环构成了一个四极静电阱, 并将它叠加到磁光阱(MOT)上。在MOT中通过光缔合技术来产生超冷NaCs分子, 并囚禁在四极静电阱中。受背景气压的限制, 冷分子囚禁的时间为 $225\pm 10\ \text{ms}$ ^[37]。

2011年, Rempe小组提出并实验验证一种微结构的箱型静电阱^[38], 它由一个高压周边电极与一对带有微结构表面电极的平行板电容器组成。势阱囚禁区域的尺寸为 $4\ \text{cm}\times 2\ \text{cm}\times 3\ \text{mm}$ 。通过弯曲静电四级杆导引的低速 CH_3F 分子被导引、装载入势阱中, 相应的存储寿命达到 $12.2\pm 0.2\ \text{s}$ 。通过缓慢增大势阱的囚禁体积, 分子被绝热冷却到约 $120\ \text{mK}$ 。

2007年, 我们小组提出了一种基于单个环形载荷导线的极性冷分子静电表面阱, 可用于弱场搜寻态分子的静电表面囚禁^[39]。采用有限元法计算了相应的电场分布, 并利用蒙特卡罗方法模拟了冷分子的装载与囚禁动力学过程, 研究了装载效率与装载时间的关系等。随后, 我们还提出了基于两个层叠的环形载荷导线的冷分子静电表面阱, 并开展了相关研究^[40]。2013年, 本小组提出了一种由两个对称放置的球形电极构成的冷分子静电阱方案^[41], 该方案的特点是光学通道几乎是三维开放的, 可用于冷分子的激光探测、操控和激光冷却, 包括光学势蒸发冷却等。我们推导了势阱空间电场分布的解析表达式, 并以弱场搜寻态的 ND_3 分子为例数值模拟了分子被装载与囚禁的动力学过程。随后, 还对上述方案进行了改进, 并开展了相关的理论研究^[42]。结果表明, 该静电阱的装载效率高达90%。

3.1.3 冷分子存储环

静电分子阱的特点是在空间中存在一个势能最低点, 而储存环的势能最低点在空间形成一个圆, 也就是说, 储存环其实是一个二维静电阱。

储存环的优点是可以对平均速度不为零的分子波包进行限制，并且这些分子可以在特定的位置和时间与其他分子或电磁场多次重复相互作用。制作储存环最简单的办法是将六极杆弯曲成圆环。2001年，Meijer小组成功地将减速后的低速ND₃分子装载到一个静电六极杆储存环中，实验装置如图12所示^[43]。

当减速后的低速分子沿着切线入射到六极杆储存环之间时，在六极杆上突然加上电压。六极杆内部的非均匀静电场可以提供足够大的向心力，从而将分子限制在

储存环内部某一稳定的轨道上。在实验中，一个分子数目约10⁶、平动速度中心为89 m/s的ND₃分子波包被装载进入周长约为80 cm的储存环。分子波包在经过了6圈的“旅行”之后，逐渐扩散到整个储存环中。

这种储存环的不足是对运动分子在纵向没有聚束效果。由于分子波包有一定的速度分布宽度，其在演化过程中会逐渐展宽，最终弥散在整个储存环中。解决该问题的方法是在环上开两个空隙，即将一个整环一分为二，变成两个半环，如图13(a)所示。当分子波包经过空隙时改变储存环上的电压来对分子进行纵向聚束，压缩分子波包的宽度，从而使分子波包在环内运动的圈数大大增加。这种结构的储存环也叫分子同步聚束器，由Meijer小组于2007年在实验上首次实现^[44]。如果将储存环分为更多小段，每个小段留有一定空隙用于对分子进行纵向聚束，那么这种储存环(或分子同步聚束器)可以同时储存多个分子波包，并且分子波包在空间运行的距离也将大大增加。2010年，Meijer小组采用如图13(b)所示的储存环装置，在实验上实现了长达1英里以上的分子波包运行距离^[45]。



图12 ND₃分子静电存储环的(a)实验装置与(b)结果

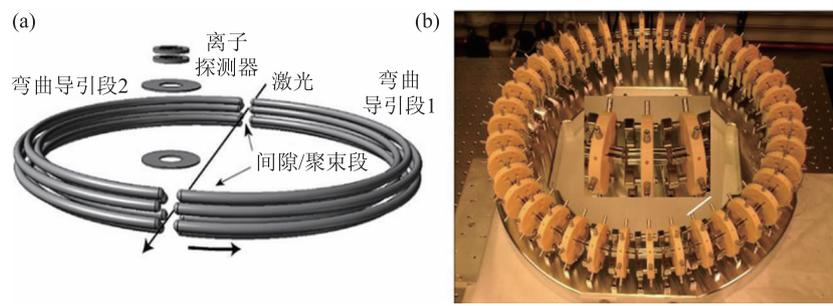


图13 分子同步聚束器的实验装置

2010年，我们小组提出了一种基于单根圆形载荷导线的冷分子静电表面存储环方案^[46]。该方案由一根放置于介质表面的环形载荷导线和一个平行板电容器构成。在环形导线和平行板电容器上施加合适的电压，在导线的表面上方可以形成一个空心的环形静电导管，可用来束缚低速的弱场搜寻态分子。与六极杆存储环相比，该结构更简单，空间更开放，有利于被束缚分子的光探测，目前正在实验验证中。为了彻底解决电容器上极板对分子操控和探测可能带来的影响和不便，我们随后提出了改进的方案^[47]：移除了电容器上极板，采用两个分别镶嵌在介质内部和表面层叠的环形导线实现了真正意义上的分子表面存储环。最近，我们又提出了一种采用圆形电极构造的行波分子同步器的新方案，实现了分子波包的同步加速、同步减速和同步聚束等三大操控^[48]。

3.2 冷分子的静磁囚禁

1998年，Doyle小组首先报道了顺磁分子CaH的静磁囚禁^[49]，实验装置如图14所示。一对

超导反 Helmholtz 线圈包裹着一个铜腔室，在铜腔室中心产生阱深约 3 T 的球形四极磁阱。磁阱充满了约 300 mK 的低温缓冲 ^3He 原子气体。通过激光束消融产生的顺磁 CaH 分子和低温缓冲 ^3He 原子气体发生弹性碰撞，重新热化后被冷却下来，称为缓冲气体冷却。速度较低、动能较小的 CaH 分子被捕获到铜腔室中心的弱场区域，而速度较高、动能较大的分子则会逃离磁阱的束缚。实验估计被囚禁 CaH 分子数约为 10^8 ，囚禁温度为 400 ± 50 mK，分子密度为 $8.0 \times 10^7 / \text{cm}^3$ ，观察寿命超过 2 s。与没有磁阱的条件相比较，分子密度增大了 20 倍。

2002 年，Vanhaecke 等人实现了超冷 Cs_2 分子的磁囚禁^[50]。该双原子分子是由超冷的 Cs 原子在 MOT 中进行光子缔合再通过自发辐射后得到的。处于弱场搜寻态并且位于最低电子三重态的 Cs_2

分子是通过四级磁阱累积来得到的。阱中分子累积与囚禁损失相互竞争达到平衡后，在磁阱中就有了稳定的态布居。对于顺磁性分子，可以先利用 Zeeman 效应进行减速，然后采用磁场进行囚禁^[51]。许多分子，像处于基态时的 OH 自由基不但具有理想的 Stark 分裂，还具有理想的 Zeeman 分裂。将 Stark 装置与 Zeeman 装置结合起来将增加操控这些粒子的可能性。目前，实验上已经实现了静电 Stark 减速后的 OH 自由基的电磁阱囚禁^[52]，该电磁阱包含一对安装在分子束轴线上的反 Helmholtz 线圈、四级静电电极以及磁铁上的磁反射镜等^[53]。

3.3 冷分子的激光囚禁

1998 年，Knize 小组首先报道了同核双原子 Cs_2 分子的光学囚禁^[54]。在 MOT 中通过增加磁场的梯度来压缩磁光阱，提高阱中原子的密度。阱中的冷原子通过三体复合碰撞产生同核双原子 Cs_2 分子，这些分子平动温度约为 100 μK 。然后，将这些 Cs 原子和 Cs_2 分子转移到由聚焦 CO_2 激光束形成的光阱中，实现其光学囚禁。最后，通过光致电离和 TOF 光谱技术来探测阱中的中性同核双原子 Cs_2 分子。实验装置如图 15(a)所示， CO_2 囚禁激光束和泵浦光束沿着同一方向重叠入射，MOT 光束沿着图中虚线方向入射，再泵浦光束沿着 x 方向入射。“pushing”（推斥）光束用于将原子从偶极阱中推出去，留下冷分子在光阱中。被囚禁的 Cs 原子和 Cs_2 分子通过脉冲的光致电离光束电离，最后通过多通道倍增管来探测。实验结果如图 15

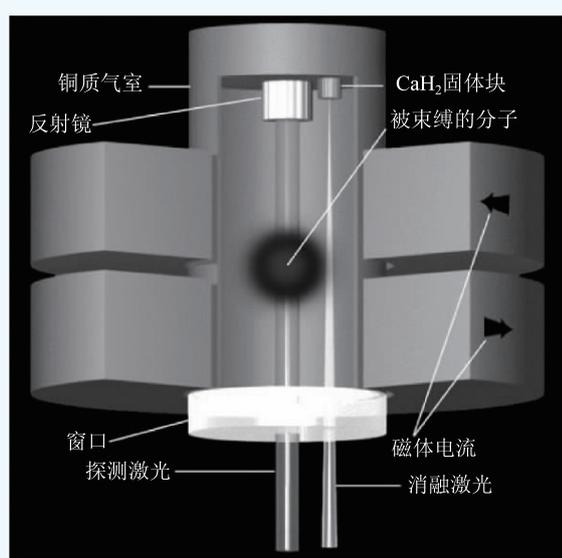


图 14 顺磁 CaH 分子静磁囚禁的实验装置

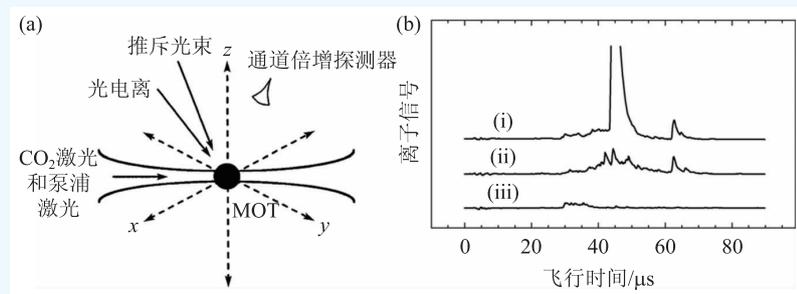


图 15 Cs_2 分子光学囚禁的(a)实验装置与(b)结果

(b)所示：曲线(i)为 MOT 关掉后 110 ms 观测到的 TOF 离子光谱，图中大的信号峰和小的信号峰分别对应 Cs^+ 和 Cs_2^+ 离子信号；曲线(ii)是当 MOT 关掉后，使用了一个“pushing”光束将光阱中的大部分原子移走时，在 110 ms 时阱中剩下的 Cs^+ 和 Cs_2^+ 离子信号；曲线(iii)是 MOT 关掉后，没有使用 CO_2 囚禁激光束，在 110 ms 时阱

中的背景离子信号。通过对阱中分子离子信号随时间变化的测量,他们推断冷分子在光阱的寿命大约为0.5 s,阱中分子的产生速率为 600 s^{-1} 。

2008年,耶鲁大学的DeMille小组实现了处于电子基态的RbCs分子的光学囚禁^[55]。RbCs分子由激光冷却后的⁸⁵Rb原子和¹³³Cs原子通过光缔合形成。研究发现,这些分子和Rb、Cs原子之间的非弹性碰撞速率取决于分子的振动能级。同时,他们还估算了分子之间的非弹性散射率,讨论了产生振动基态分子的可能性。

4 总结与展望

随着冷分子减速与冷却技术的发展,获得的冷分子温度越来越低。高密度、超冷分子样品的获得,将为冷分子操控的研究和发展提供极大的便利。关于冷分子操控的基本原理可概括为两大类:一是利用冷分子和其他基本粒子(如原子、分子、电子等)之间的相互作用;二是利用冷分子和外场(包括电场、磁场、光场或微波场等)之间的相互作用。尽管现有的理论和实验已对上述两类相互作用开展了若干研究,并取得了一些创新性的研究成果,但我们对微观世界的了解还远远不够,尚有许多问题等待我们去发现和研究。科学

研究的最终目的是为了应用。绝大多数的冷分子应用研究,如冷分子干涉计量、超高分辨冷分子光谱、精密测量物理、集成分子光学与分子芯片、量子计算与信息处理、量子模拟与量子仿真、冷分子刻蚀与微纳米新材料的制备等,都离不开对冷分子的光电操控。因此,冷分子操控技术的发展必将进一步推动冷分子应用研究的不断拓宽与深化。

综上所述,目前国际上有关“冷分子制备与操控”的理论与实验研究起步不久,犹如一张白纸,存在着许多机会与挑战;国内有关这方面的研究刚刚开始,相应的基础与应用研究还存在着许多空白。坚持该方向的研究与积累不仅可推动冷分子物理、分子光学、量子光学、精密测量科学、量子信息科学、超冷化学、冷分子精密光谱学,甚至凝聚态物理、核物理和粒子物理等学科的发展,带动相关学科的基础研究,而且可发展出许多高新技术,推动人类社会和国民经济的快速发展。此外,由于分子是保留物质化学属性的最小单位,也是跨接物理学和化学及其他交叉学科的桥梁,因此,冷分子的制备与操控、冷分子物理与分子光学及其超冷分子光谱学在化学、天文学、环境科学、材料科学,甚至生物科学等领域中也有着潜在的应用前景。

参考文献

- [1] Loesch H J, Scheel B. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 85: 2709
- [2] Wall T E. *Phys. Rev. A*, 2009, 80: 043407
- [3] Putzke S *et al.* *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2011, 13: 18962
- [4] Strebel M *et al.* *Phys. Rev. A*, 2011, 84: 053430
- [5] Jongma R T, Rasing T, Meijer G. *J. Chem. Phys.*, 1995, 102 (5): 1925
- [6] Weibel M A, Hain T D, Curtiss T J. *J. Chem. Phys.*, 1998, 108 (8): 3134
- [7] Hain T D, Moision R M, Curtiss T J. *J. Chem. Phys.*, 1999, 111 (15): 6797
- [8] Harland P W, Hu W P, Vallance C. *Phys. Rev. A*, 1999, 60 (4): 3138
- [9] Rangwala S A *et al.* *Phys. Rev. A*, 2003, 67: 043406
- [10] Junglen T *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 92: 223001
- [11] Xia Y, Yin Y, Chen H *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 100: 043003
- [12] Xia Y, Yin Y, Chen H *et al.* *J. Chem. Phys.*, 2008, 128: 094301
- [13] Deng L, Xia Y, Yin J. *Chin. Phys.*, 2007, 16 (3): 707
- [14] Gu Z X *et al.* *Phys. Rev. A*, 2013, 87: 053401
- [15] Sun M, Yin J P. *Phys. Rev. A*, 2008, 78 (3): 033426
- [16] Sun M, Yin J P. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, 25 (7): 1214
- [17] Deng L Z, Yin J P. *Opt. Lett.*, 2007, 32: 1695
- [18] Deng L Z *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 106: 140401
- [19] Wark S J *et al.* *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 1992, 25: 4229
- [20] Schulz S A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93: 020406
- [21] Ryytty P *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 84: 5074
- [22] Kallush S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95: 163005
- [23] Dong G J *et al.* *Phys. Rev. A*, 2005, 72: 031605(R)
- [24] Yin Y L *et al.* *Chin. Phys. Lett.*, 2008, 25 (9): 3215
- [25] Stapelfeldt H *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 79: 2787
- [26] Zhao B S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 85: 2705

- [27] Merz S *et al.* Mol. Phys., 2013, 111: 1855
[28] Bethlem H L *et al.* Phys. Rev. A, 2006, 74: 063403
[29] van Veldhoven J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 94: 083001
[30] Schnell M *et al.* J. Phys. Chem. A, 2007, 111: 7411
[31] Bethlem H L *et al.* Nature, 2000, 406: 491
[32] van de Meerakker S Y T *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 94: 023004
[33] Gilijamse J J *et al.* J. Chem. Phys., 2007, 127: 221102
[34] Hoekstra S *et al.* Phys. Rev. A, 2007, 76: 063408
[35] Meek S A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2008, 100: 153003
[36] Rieger T *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 95: 173002
[37] Kleinert J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 99: 143002
[38] Englert B G U *et al.* Phys. Rev. Lett., 2011, 107: 263003
[39] Ma H *et al.* Chin. Phys. Lett., 2007, 24: 917
[40] Li S Q *et al.* Chin. Phys. B, 2014, 22: 123701
[41] Wang Z *et al.* J. Opt. Soc. Am. B, 2013, 30: 2348
[42] Sun H *et al.* Chin. Phys. B, 2015, 24: 113101
[43] Crompvoets F M H *et al.* Nature, 2001, 411: 174
[44] Heiner C E *et al.* Nature Phys., 2007, 3: 115
[45] Zieger P C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2010, 105: 173001
[46] Deng L, Xia Y, Yin J. J. Opt. Soc. Am. B, 2010, 27 (6): 88
[47] Li S Q *et al.* J. Opt. Soc. Am. B, 2014, 31 (1): 110
[48] Hou S *et al.* Scientific Rep., 2016, 6: 32663
[49] Weinstein J D *et al.* Nature, 1998, 395: 148
[50] Vanhaecke N *et al.* Phys. Rev. Lett., 2002, 89: 063001
[51] Hogan S D *et al.* Phys. Rev. Lett., 2008, 101: 143001
[52] Sawyer B C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 98: 253002
[53] Metsälä Markus *et al.* New J. Phys., 2008, 10: 053018
[54] Takekoshi T *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81 (23): 5105
[55] Hudson E R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2008, 100: 203201



扫码预登记 轻松观展

world-of-photonics-china.com.cn
world-of-photonics-china.com

2018年3月14-16日 MARCH 14-16, 2018
上海新国际博览中心 SHANGHAI NEW INTERNATIONAL EXPO CENTRE

慕尼黑上海光博会

LASER World of PHOTONICS CHINA

