

超冷单原子分子阵列*

詹明生[†]

(中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 波谱与原子分子物理国家重点实验室
武汉 430071)

2022-01-25 收到

[†] email: mszhan@apm.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20220203

Ultracold single atom and molecule arrays

ZHAN Ming-Sheng[†]

(State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Innovation
Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences,
Wuhan 430071, China)

摘要 用光镊形成光阱囚禁单个原子、用激光将单个原子冷却到基态形成超冷原子、将超冷原子相干合成单个超冷分子、将单原子分子重排串成丰富多样的超冷单原子分子阵列,这就构成了精密相干可控的多粒子量子系统,为多种前沿科学研究与技术发展提供难得的量子平台。文章介绍近年来在单原子量子态高保真操控、异核原子量子纠缠、原子—分子耦合态相干控制、单个超冷分子的相干合成、异核原子阵列确定性制备等方面所取得的最新研究结果;对未来在多体物理、超冷化学、精密测量、量子模拟、量子计算等方面的发展前景进行了展望。

关键词 超冷原子, 单原子分子, 超冷化学, 精密测量, 量子计算

Abstract Trapping single atoms with optical tweezers, cooling the atoms to the ground state to form ultracold atoms, coherently controlling them to form single ultracold molecules, then rearranging them into a rich and diverse array of ultracold single atoms and molecules, all of these steps create a precise and coherently controllable multi-particle quantum system, and provide a rare quantum platform for a variety of frontier scientific research and technology development. This article reviews the latest progress in the study of ultracold single atom and molecule arrays. Recent results on high fidelity control of quantum states of single atoms, heteronuclear quantum entanglement, coherent control of atom-molecule states, coherent formation of a single molecule, and deterministic preparation of heteronuclear atom arrays are outlined. The future prospects in many-body physics, ultracold chemistry, precision measurement, quantum simulation and quantum computation are presented.

Keywords ultracold atoms, single atoms and molecules, ultracold chemistry, precision measurement, quantum computation

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2016YFA0302800, 2017YFA0304501)、国家自然科学基金(批准号: 11674361, 11774389)和中国科学院先导专项(批准号: XDB21010100)资助项目

1 引言

原子与分子是物质组成的一个基本层次, 研究这个层次的物理学是原子分子物理, 研究内容是原子分子的结构、动力学与环境效应。

20 世纪八九十年代, 以扫描隧道显微镜 (STM)、荧光探针等技术为代表的表面单分子科学的形成与发展, 对物理、化学、生物、电子工程等领域带来了深远影响。然而, 由于表面单分子与环境有着强耦合、存在热噪声等特性, 会对分子产生强的退相干效应, 导致人们难以在保持量子特性(如量子相干叠加态、纠缠态)的前提下对其进行测量和操控。

本文所指的单原子分子是在真空中以气态状态自由运动的单个原子或分子。与凝聚体表面单原子层中可分辨的单个原子不同, 气态单原子是完全孤立的原子。现代原子分子物理的发展从测量扩展到调控, 对单原子、单离子、单分子等单量子体系的精密操控结合量子纠缠量子资源的应用, 构成了第二次量子革命的关键表征。

2015 年, 我曾就“单原子激光操控研究进展”为题^[1]介绍了当时的单原子操控的进展情况。几年过去了, 单原子操控领域的进展印证甚至超出了我当时的展望。这些进展包括: (1) 光阱中单个原子内外态的操控达到了极高的精度(保真度); (2) 将两个单原子确定性地相干合成为单个分子; (3) 形成确定性任意花样无缺陷的单原子阵列; (4) 利用里德伯(Rydberg)相互作用, 实现高保真度纠缠, 并生成多粒子纠缠态等。

2 单原子量子态的高精度操控

2.1 魔幻光强偶极阱将原子的相干时间延长至秒级

通常选取单个碱金属原子(⁸⁵Rb 或 ⁸⁷Rb)基态的两个超精细结构能级系统($F=2, 3$ 或 $F=1, 2$)作为一个量子比特。在光阱(又称光镊)中囚禁的单原子, 首要的特征指标是原子在阱中的寿命及量子

相干性能维持的时间(相干时间)。在早期的研究中发现阱中原子的寿命可超过 10 s, 但相干时间只能达到 1.4 ms(见文献[1]中表 2), 受限于一温度下的能量分布而引起的非均匀退相干, 其根源是光阱的光强分布不均匀所导致的交流斯塔克(Stark)光频移的不均匀。为了解决这个问题, 我们在实验中首先测出 Rb 原子的超极化率, 发现差分光频移与囚禁光光强(阱深)之间出现抛物线依赖性(图 1), 由此创造出了一个魔幻光强偶极阱(MI-ODT)^[2], 在该光阱中原子的相干时间大大延长, 从 1.4 ms 延长至 200 ms, 该相干时间仅受限於磁场的起伏。后来通过改善磁场起伏, 使相干时间达到近 1 s 的量级^[3](表 1)。另一个奇妙的特性是, 在 MI-ODT 中, 通过一个移动光阱将原子量子比特在不同阱之间转移时, 转移前后原子的相干性基本保持不变, 携带量子信息的原子在光阱之间移动时如履“平地”, 量子信息不丢失。

至此, 魔幻光阱在中性原子激光囚禁中得到了充分的应用。用作光阱的激光的各项参数都可能作为魔幻参数(表 2), 通过独立或者联合地改变这些参数可以找到一个值, 在这个值附近原子能级频移之差为零或对囚禁激光的光强起伏不敏感(一阶导数为零)。魔幻波长已被广泛用于光晶格中性原子光钟。在 MI-ODT 首次在 Rb 实现^[2]之后, 研究原子光钟的小组相继在 Yb 光钟^[4]和 Sr 光

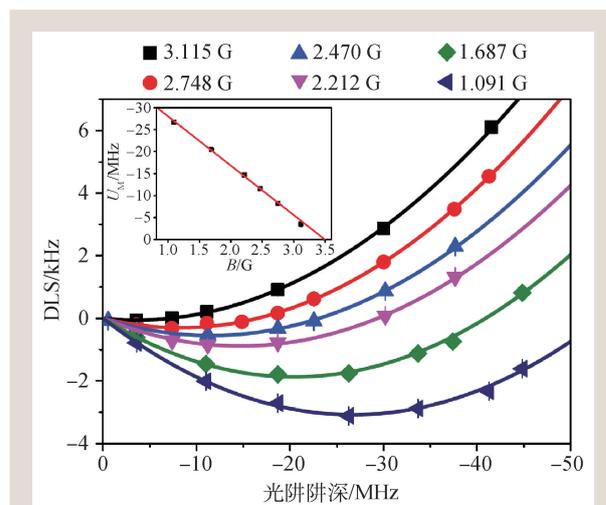


图 1 光阱中 Rb 原子能级之间的差分光频移(DLS)与光阱阱深及磁场的依赖关系^[2]

表1 魔幻光强偶极阱中⁸⁷Rb单原子相干时间评估

	退相干机制	2016年结果 ^[2]			2020年结果 ^[1]	
		参数	弛豫时间		参数	弛豫时间
			转移前	转移后		
均匀 退相干时间 T_2^*	磁场起伏	$\sigma_B = 0.019\%$	300 ms	300 ms	$\sigma_B = 0.00179\%$	3.40 s
	光强起伏	$\sigma_I = 0.0015$	200 s	200 s	$\sigma_I = 0.0014$	~200 s
	阱重叠与激光指向不稳定性	$\sigma_{\text{point}} = 0.06$	—	30 s	$\sigma_{\text{point}} = 0.06$	30 s
	微波频率起伏	$\sigma_{\text{mw}} = 0.1 \text{ Hz}$	2.2 s	2.2 s	$\sigma_{\text{mw}} = 0.68 \text{ mHz}$	330 s
	加热	2 $\mu\text{K/s}$	34 s	34 s	2 $\mu\text{K/s}$	34 s
	合并 T_2^*			261 ms	259 ms	
不均匀 退相干时间 T_2^*	热运动	~8 μK	2 s	—	~8 μK	2.50 s
	转移加热	< 10 μK	—	> 1.2 s	—	
合并横向弛豫时间 $T_2 = 1/(\frac{1}{T_2^*} + \frac{1}{T_2^*})$			245 ms	> 215 ms		1.36 s
自旋弛豫时间 T_1		0.66 s · mK	4 s	4 s	0.66 s · mK	6 s
合并总弛豫时间 $T = 1/(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2})$			~230 ms	~204 ms		~1.11 s
实验测量结果			~200 ms	~200 ms		~1.15 s

表2 魔幻光阱的各种魔幻参数

名称	参数意义	含义
魔幻波长(或频率)	光阱的激光波长(或频率)	处于魔幻波长(或频率)光阱或光晶格中原子两能级的极化率相等, 能级 AC-Stark 光频移之差为零, 对光强变化不敏感
魔幻光强	光阱的激光强度	处于魔幻光强光阱中原子两能级之间的光频移之差的一阶导数为零, 对光强变化不敏感
魔幻偏振	光阱的激光偏振	处于魔幻偏振光阱中原子两能级之间的光频移之差为零, 对光强变化不敏感
魔幻磁场	光阱处的磁场强度	处于魔幻磁场中原子两能级之间的磁频移之差为零, 对磁场变化不敏感

钟^[5]中也测到了超极化率并发现 MI-ODT 对实现 10^{-19} 精度光钟的重要性。最近国内山西大学张天才小组用 Cs 原子实现了三重魔幻囚禁^[6]。我们为了将两种不同的原子(⁸⁵Rb 和 ⁸⁷Rb)魔幻囚禁到同一个光阱中, 发现囚禁激光的偏振度也可以作为另一个独立的参数进行优化, 使得两种同位素的原子在阱中的相干时间基本均衡, 且都达到近 1 s 量级^[3]。

2.2 高保真度单比特量子门

在阱中原子量子态相干性保持良好的前提下, 就可以对量子态进行相干操控了。量子态操控的重要指标是操控的精度, 而操控精度可定量地用保真度来表征。保真度描述的是两个量子态的相似程度, 或者是两者之间的“距离”。逻辑门操作的保真度, 描述的则是一个量子初态经过量

子逻辑门操作后, 实际得到的末态与理论末态的差别, 或者是回到初态的程度。量子过程层析方法能用来标定单比特逻辑门的保真度, 但还原的操作矩阵的准确度与初态制备和末态探测效率相关。对中性单原子体系而言, 单比特量子逻辑门的保真度一般高于态制备和态探测的保真度, 为了独立提取单比特逻辑门的保真度, 实验中采取随机化标定(RB)的方法, 即从 24 个 Clifford 门中随机重复地选取门操作, 探测单原子量子比特回到初态的概率, 即得到单比特逻辑门的错误率 ε_g 和保真度 $F=1-\varepsilon_g$ 。在我们构建的 4×4 二维 MI-ODT 阵列中^[7](图 2), 依次测得 16 个比特中每个门的最低错误率为 $(3.0 \pm 0.7) \times 10^{-5}$, 每个全局门的平均错误率为 $(4.7 \pm 1.1) \times 10^{-5}$, 相应的保真度约为 99.995%, 这是目前报道的中性原子单比特量子门最高的保真度。

3 超冷单分子的相干合成

分子由原子组成，这已是常识。但如何确定性地、受控地从原子生成分子，又从分子转化为原子，这是人们长期以来的梦想。从物理的角度，两个原子可发生弹性碰撞、非弹性碰撞，甚至通过反应性碰撞结合在一起形成分子。从化学角度，基元化学反应动力学是反应物与产物之间物质转换的基本过程，态—态反应动力学一直是化学的前沿。无论是碰撞过程还是反应过程，在两个参数的控制上遇到了极大的困难，一是参与碰撞的原子数不确定，二是作为碰撞对(反应物)的原子的相对运动(反应坐标)难以控制。冷原子物理研究为这两个问题的解决提供了出路，前者通过单原子囚禁技术可以实现两个确定的原子的碰撞^[8]；后者则通过操控超冷原子外态从而合成超冷分子，并逐步形成了一个新的学科方向——超冷化学^[9]。下面以超冷单分子的相干合成为例介绍是如何做到的。首先将两个同位素Rb原子(一个⁸⁵Rb和一个⁸⁷Rb)分别在各自的光阱中冷却到基态，然后将两个光阱合并，把两个原子无加热地转移到一个阱中，最后控制原子之间的相互作用从而生成一个⁸⁵Rb⁸⁷Rb分子。

第一步是将⁸⁵Rb和⁸⁷Rb分别冷却到各自光阱的三维振动基态。囚禁在mK深度光阱中的原子，当其原子温度在 μK 量级时，原子几乎处于势阱的底部，此时可以将势阱近似成谐振势，原子的外态(运动态)能级是量子化的。当原子温度被进一步冷却到nK量级之后，原子几乎全部处于谐振子的基态，此时原子运动态波包被约束在光阱的基态高斯分布中，成为超冷原子。近二十多年以来，人们通过不同的冷却方法，已经成功地把囚禁的离子、原子和纳米机械振子等冷却到了运动基态。在中性原子中，已经相继将单个碱金属和碱土金属原子冷却到三维谐振势阱的基态。

而我们的难点是，将两个不同种类的原子同时冷却到势阱基态上。实现基态冷却的方案有二能级原子边带冷却、拉曼边带冷却、电磁感应透明冷却以及微波边带冷却等。其中二能级原子边带冷却利用囚禁势的非谐性和超窄线宽的激光来分辨谐振子能级，逐步将高振动能级的原子抽运到基态，这种直接边带冷却的技术已经成功用于碱土金属离子和原子等具有长寿命、亚稳态的离子和原子体系。对于Rb原子这种碱金属原子，拉曼边带冷却是最佳冷却方法。我们通过三个维度的拉曼光和回泵光，经过大约80个冷却循环之后，原子径向的量子数为 $n_r=0.02\pm 0.03$ ，轴向量子数为 $n_z=0.02\pm 0.03$ ，基本处于势阱的三维基态上。拉曼边带冷却之后，在1.5 mK的阱深下，原子的温度被冷却到了4 μK ，而把阱深降低到0.03 mK之后，原子温度降低到了500 nK。

原子冷却到基态之后，光阱中原子的运动态是通过原子自旋与运动波函数耦合(spin-motion coupling, SMC)机制来精密控制的。当原子在梯度磁场中时，不同的磁子能级感受到不同的势，从而使得不同内态所对应的空间波函数产生相对移动，即施特恩—格拉赫效应。在我们的实验中，囚禁Rb原子的光阱是由波长为852 nm的高斯光聚焦而来的，在焦点处激光束腰大小约为750 nm。在这个条件下，焦点处的线偏振激光，由于矢量衍射效应会伴生椭圆偏振梯度，椭圆偏振光场对原子诱导出矢量光频移，从而产生等效的虚拟梯度磁场。正是这个虚拟的梯度磁场诱导

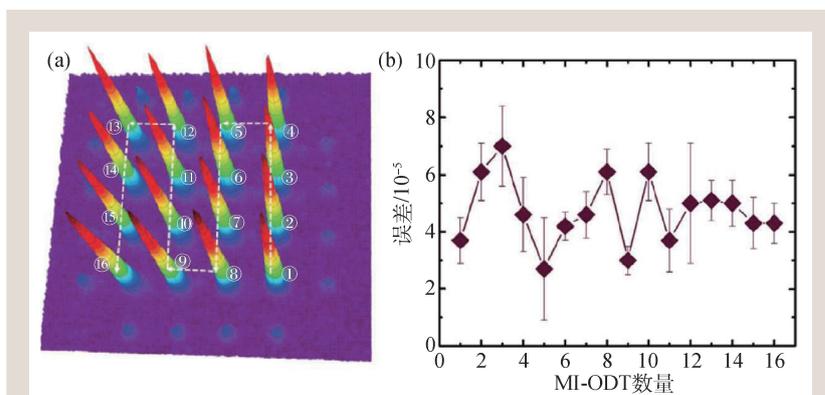


图2 二维4×4 MI-ODT原子阵列中，用随机化标定方法按顺序(a)测得的16个原子单比特量子门的误差(b)^[7]

了单原子与其量子化运动态的耦合，即SMC。利用态依赖势实现了异核双原子的无加热合并，并实现了异核原子运动波函数的完全重叠^[10]。SMC使得原子的不同运动态的波函数不再正交，处于梯度磁场中的原子在微波的驱动下于磁子能级之间跃迁时，会伴随着运动态的改变，因此可以用微波来操控原子在光阱中的运动态。实验证明我们对原子外态操控的保真度高于99%^[11]。

扩展到阱中双原子的情形，双原子的运动态可以看作是两原子之间的相对运动和两者共同的质心运动。在SMC机制支配下，光阱中的两个原子之间的相对运动波函数偏离分子相互作用势的中心。理论计算表明，在这种条件下，双原子相对运动波函数与弱束缚态波函数之间的重叠积分得到增强，也就是原子—分子间的微波跃迁概率得到提高。最终，我们在单个光阱中利用微波实现了一对超冷异核原子(⁸⁵Rb和⁸⁷Rb)到单个分子(⁸⁵Rb⁸⁷Rb)之间的相干超冷化学反应，如图3所示，在国际上首次实现了单个超冷分子的相干合成^[12]。通过调整微波脉冲的长度，我们又观察到

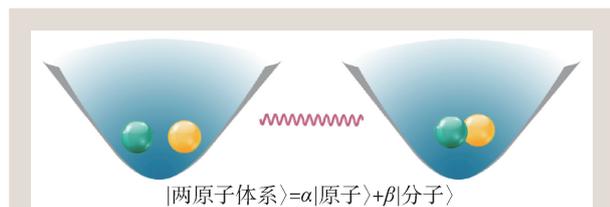


图3 在光阱中实现的处于相干叠加态的“原子—分子”体系示意图。圆球代表不同的原子，波浪线代表电磁场。右图代表分子，左图代表两个分开的原子，电磁场可使体系在两个原子与单个双原子分子之间产生拉比振荡

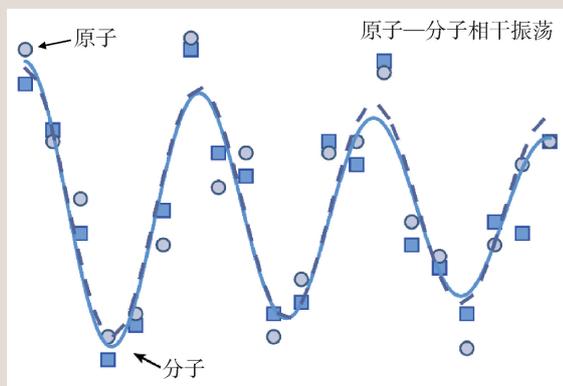


图4 原子—分子态之间的相干拉比振荡

光阱中双原子与单个分子之间长寿命的拉比振荡(图4)，即实现了双原子量子体系中原子态与分子态的可控相干叠加与相互转化。

这项工作巧妙地应用了光镊中固有的偏振梯度场对原子产生的等效虚拟梯度磁场效应，实现了原子自旋与双原子相对运动的耦合。同时选用微波而非激光来合成分子，相对于激光来说，微波不会对原子产生自发辐射等退相干效应。实验证明SMC方案是一种纯净的分子态操控方法，具有优越的相干性。这是一种全新的分子合成范式，从物理机制上有别于传统的光缔合和磁缔合的分子合成方案。SMC兼顾了以上两种方案的优点，既有与基于费希巴赫(Feshbach)共振一样的相干特性，又适用于更多的原子—分子系统，如重要的碱金属—碱土金属混合双原子分子系统等。

通过相干合成分子，实现了两原子—分子体系内外态所有自由度的全面相干操控。为基元化学反应过程相干控制、量子少体束缚态的相干合成及其量子调控提供了可能性。

4 异核原子的高保真度量子纠缠

量子纠缠是理解强关联多体体系奇异物理的关键，也是量子信息处理的宝贵资源。但量子纠缠很脆弱，易受环境退相干因素的干扰。各种量子计算物理实现方案的成功与否很大程度上取决于量子纠缠保真度的高低，通用容错的量子计算机更直接依赖于逻辑门的保真度。在中性原子体系中，改善量子纠缠有两个前沿方向，一是避免量子比特之间串扰的异核量子纠缠，二是抑制环境退相干的高保真两比特量子逻辑门。

4.1 异核原子量子纠缠

与全同粒子的纠缠相比，非全同粒子的关联提供了更丰富的物理。对于量子信息而言，异种粒子的纠缠在连接量子网络进行量子非破坏读出和内存保护方面具有独特的优势。在中性原子系统中，操纵多元素单原子可以为量子模拟提供额

外的自由度；在实现 Rydberg 量子模拟器时，另一种原子量子比特可以作为辅助比特来操纵或调节目标比特中的多体自旋相互作用。在量子信息处理时，由于两种原子的共振频率不一样，光谱隔离使得原子阵列中微米间距量子比特之间无读出串扰，且两种量子比特各自可以独立寻址。

在实验中异种原子的量子纠缠是在两个独立的同位素 Rb 原子(一个 ^{85}Rb 和一个 ^{87}Rb)之间实现的^[13](图 5)。原子被限制在间隔为 $3.8\ \mu\text{m}$ 的单原子光学阱中。我们将 ^{87}Rb 基态 $|F=1, m_F=0\rangle$ 和 $|2, 0\rangle$ 编码为控制量子比特，而将 ^{85}Rb 基态 $|2, 0\rangle$ 和 $|3, 0\rangle$ 编码为目标量子比特，Rydberg 态都是 $|r\rangle = |79D_{5/2}, m_j = 5/2\rangle$ 。利用两个原子共振频率的差异来单独处理和操纵它们，确保了在状态测量和短原子间距的量子比特操作中串扰可以忽略。这与同种原子的纠缠非常不同，同种原子必须通过空间位置来区分彼此，它们的空间波函数不能重叠。通过异核原子相互作用的 Rydberg 阻塞效应生成一个异核受控非门(CNOT)量子门并产生纠缠。对原子损失不做任何修正所得到的 CNOT 门和纠缠的原始保真度分别为 0.73 ± 0.01 和 0.59 ± 0.03 。这个纠缠保真度虽然不高，但却是异核中性原子量子纠缠的首次实验探索。最近也有实验演示了两种不同种类离子的量子纠缠。

这个结果为多种原子相互作用体系的多体模拟和异核体系量子计算开辟了道路。不同种类的原子可以囚禁在具有任意几何形状的阵列中，以实现奇异自旋模型的 Rydberg 量子模拟器，如 Kitaev 环形码、颜色码或相干能量转移等。

4.2 98%保真度的两原子量子纠缠

在已知的 7 种量子计算物理方案中，中性原子体系与离子阱中的离子类似，具有优质的相干可控量子比特的潜力。然而两比特量子门保真度一直是中性原子体系发展“卡脖子”的问题。

原子体系利用 Rydberg 阻塞效应可以很方便地实现两个原子相互作用的开关控制，但同时

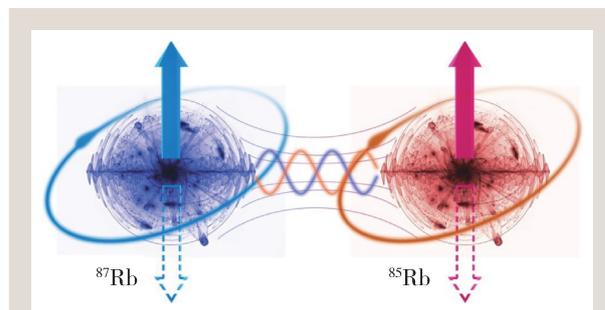


图5 两个异核原子(一个 ^{87}Rb 和一个 ^{85}Rb)量子纠缠示意图

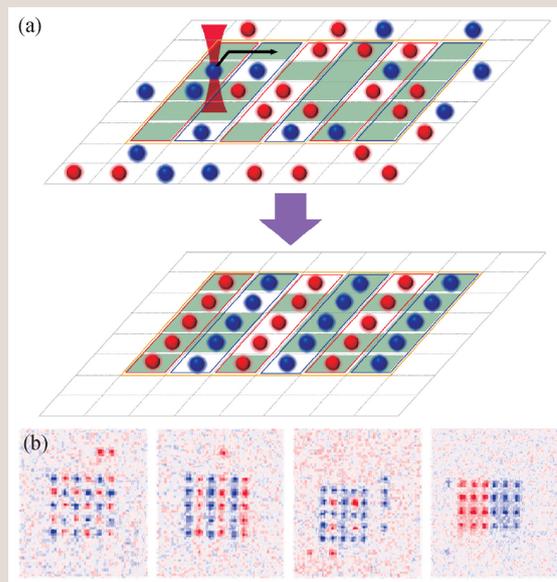


图6 通过重排算法实现的异核单原子阵列^[15] (a)重排步骤示意图；(b)实验实现的各种无缺陷混合原子阵列，相邻原子的距离为 $5\ \mu\text{m}$ 。其中红蓝色圆点分别代表 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 两种原子

Rydberg 态有限的寿命和对杂散外场的高度敏感性又限制了控制可达到的精度。在目前的实验中，Rydberg 介导的二量子比特量子门，包括 C_z 门(受控相位门)和 CNOT 门，在抑制 Rydberg 激发的激光相位噪声和各种实验条件优化之下，保真度不断提高。最近理论研究发现，影响保真度的还有一个原因是叠加态的原子激发到 Rydberg 态并保持的一定时间内，基态与 Rydberg 态之间的严重退相干。为了解决这个问题，我们开发了一种双光子 C_z 门的新方法^[14]，通过精心计算的平滑波形来获得二量子比特门所需的适当的相位积累，即单脉冲非共振调制驱动(SORMD)。利用 Rydberg 阻塞区内两个 ^{87}Rb 原子的全局 Rydberg 激发，在基

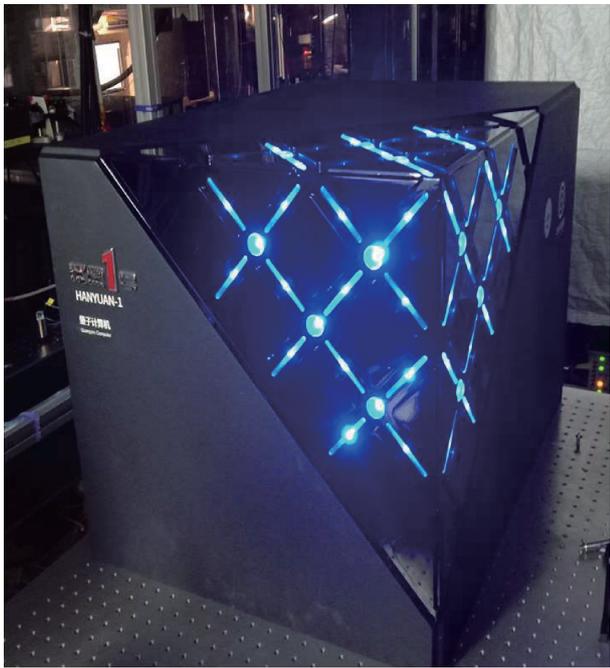


图7 正在测试中的“汉原1号”量子计算原型机

态—Rydberg 态跃迁中连续驱动，利用 SORMD 实现 C_z 门。测得双原子纠缠的原始保真度为 $F = 0.945(6)$ ，对态制备与测量 (SPAM) 进行误差校正后，提取到的纠缠保真度为 $F^c = 0.980(7)$ 。这个工作的特点是在单脉冲内完成 C_z 门操作，利用长相干拉比振荡，避免了 Rydberg 态的布居影响，为实现中性原子高保真二量子比特门提供了另一个有前景的新途径。未来的改进包括寻找更快的门操作、Rydberg 布居泄漏的进一步抑制、环境噪声的更强的鲁棒性等。

5 异核单原子阵列

近年来被光镊囚禁的中性单原子阵列被用于量子多体动力学模拟、冷分子合成、量子计算甚至光频标研究中。随着被囚禁原子数量增加到数百个，基于 Rydberg 原子阵列的量子模拟器可以解决在经典机器上难以解决的量子多体问题，具有可调互联的三维原子量子退火器也为量子优化问题带来了光明前景。这些不同的应用在单种无缺陷原子阵列上得到了部分演示，而一个未来更通用的模拟平台应该需要更多的自由度和混合种

类原子的组装。例如，离子体系的量子逻辑门操作已经受益于双种类离子。其中一种离子用于数据量子比特，另一种用于辅助量子比特，测量过程或交互冷却过程发射的光子对数据量子比特不构成串扰。与上述异核原子量子纠缠一样，双种类中性原子阵列对抑制串扰和量子误差校正编码等许多问题都有益。

到目前为止，一维到三维单种类无缺陷的原子阵列制备技术已经趋于成熟。而混合种类无缺陷原子阵列的产生面临不同种类原子在排列过程中的新的复杂性。我们最近为紧凑配置的双种原子组装设计了一种专门算法，取名为异核原子阵列的启发式异核算法 (HHA)^[15]。实验上，通过重新排列初始随机分布的原子，实现了原子的无缺陷组装和任意几何形状的二维同位素原子 (^{85}Rb 和 ^{87}Rb) 阵列的制备 (图 6)。对于 ^{87}Rb (^{85}Rb) 原子，64 原子组装的填充比为 0.89 (0.88)，主要受限于光阱中原子的寿命。经过原子重排过程，异核原子系统构型的熵降低了 5 倍。

异核原子阵列为实现低串扰、超冷的容错逻辑量子比特和全局 Rydberg 激发光束照明的量子多体模拟开辟了广阔的道路。

6 结语与展望

以上介绍了光镊中单原子分子阵列相关的几个代表性的工作进展，从中对人们高精度量子操控单原子和单分子的能力可见一斑。关于单原子分子阵列的快速低熵制备、光镊中的 Rydberg 原子阵列、碱土原子阵列、单分子阵列及低温碰撞等方面的进展，可进一步参阅新近的综述文献 [16]。

单原子分子阵列已经被证明是一个强大的平台，未来的发展可能表现在如下几个方面：一是继续沿“单体—两体—三体—少体—多体”的路径，在单体动力学到多体物理之间找到规律性的联系，上文在单分子的相干合成中已经实现了单体到两体之间的全自由度相干操控，但两体到三体的难度和复杂性将远大于前者。二是利用多原子和多分子阵列平台，在多粒子纠缠态、关联统

计及丰富的多体物理量子模拟方面开展探索。三是在超冷分子与超冷化学方面产生物理与化学结合的新交叉领域。最后显而易见的是快速推进中性原子量子计算的应用研究^[17,18]，基于中性原子量子计算的公司已在各国纷纷成立，中科酷原公司所研发的“汉原1号”也正在测试之中(图7)。

参考文献

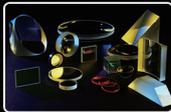
- [1] 詹明生. 物理, 2015, 44(08):518
- [2] Yang J H, He X D, Guo R J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 117: 123201
- [3] Guo R J, He X D, Sheng C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2020, 124: 153201
- [4] Brown R C, Phillips N B, Beloy K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 119:253001
- [5] Ushijima I, Takamoto M, Katori H. Phys. Rev. Lett., 2018, 121: 263202
- [6] Li G, Tian Y L, Wu W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2019, 123:253602
- [7] Sheng C, He X D, Xu P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 121:240501
- [8] Xu P, Yang J H, Liu M *et al.* Nat. Commun., 2015, 6:7803
- [9] Ospelkaus S, Ni K K, Wang D *et al.* Science, 2010, 327: 853
- [10] Wang K P, He X D, Guo R J *et al.* Phys. Rev. A, 2019, 100: 063429
- [11] Wang K P, Zhuang J, He X D *et al.* Chin. Phys. Lett., 2020, 37: 044209
- [12] He X D, Wang K P, Zhuang J *et al.* Science, 2020, 370:331
- [13] Zeng Y, Xu P, He X D *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 119:160502
- [14] Fu Z, Xu P, Sun Y *et al.* 2021, arXiv:2109.02491
- [15] Sheng C, Hou J Y, He X D *et al.* 2021, arXiv:2106.06144 (Phys. Rev. Lett., in press)
- [16] Kaufman A M, Ni K K. Nat. Phys., 2021, 17: 1324
- [17] Saffman M, Walker T G, Mølmer K. Rev. Mod. Phys., 2010, 82: 2313
- [18] 许鹏, 何晓东, 刘敏 等. 物理学报, 2019, 68:030305

致谢 感谢王谨、许鹏、何晓东、刘敏等同事参与此项工作，对尉石、杨佳恒、曾勇、王坤鹏、刘杨洋、付卓、郭瑞军、盛诚和庄军等研究生们的贡献表示感谢。


欧普特科技
 GOLDEN WAY SCIENTIFIC

做中国专业的 光学元件与光学仪器系统集成商

TO BE A PROFESSIONAL **OPTICAL COMPONENTS AND**
OPTICAL INSTRUMENTS SYSTEM INTEGRATOR IN CHINA








地址：北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋东5层
E/5F M7, NO.1, JIUXIANQIAO EAST ROAD, CHAOYANG DISTRICT, BEIJING

电话：010-8809 6218 / 8809 6099

邮箱：optics@goldway.com.cn

北京欧普特科技有限公司
Beijing Golden Way Scientific Co., Ltd.