混合原子-分子阵列中的量子逻辑控制与纠缠

Chi Zhang, [1], * Sara Murciano, [2] Nathanan Tantivasadakarn, [3] 和 Ran Finkelstein[4], †

[1] *Centre for Cold Matter, Blackett Laboratory, Imperial College London,Prince Consort Road, London SW7 2AZ, United Kingdom*[2] *Université Paris-Saclay, CNRS, LPTMS, 91405, Orsay, France.*

[3] *C. N. Yang Institute for Theoretical Physics, Stony Brook University, Stony Brook, NY 11794, USA*

[4] *School of Physics and Astronomy, Tel Aviv University, 69978, Israel*

极性分子具有丰富的内部结构，在基础物理、量子技术和受控化学领域潜力巨大。然而，由于态探测速度慢且不完善、偶极相互作用较弱，其应用目前受到限制，难以实现快速、大规模的纠缠生成。我们提出并分析了一种方案，可在由极性分子和中性原子构成的混合平台中实现量子逻辑控制和基于测量的态制备。该方法利用快速、高保真度的原子-分子门和高保真度的原子辅助量子比特测量，克服纯分子平台面临的常见挑战，同时保留其多样的结构优势。所提出的原子-分子受控相位门基于分子转动跃迁与原子里德堡跃迁之间的共振偶极-偶极交换，其速度比任何直接的分子-分子纠缠门快三个数量级。我们还进一步研究了该方案的若干应用，包括制备用于量子增强精密测量的分子 GHZ 态、制备具有拓扑序的奇异分子量子多能级态，以及研究测量改变的临界性。我们的方案适用于任何极性分子。它拓展了量子逻辑控制的范式，为大规模分子纠缠态铺平道路。更广泛地说，它展示了一种具体的混合量子系统，在其中每个量子比特都能得到最优利用，且基于测量的方法可在近期量子设备中带来显著优势。

arXiv:2602.12909v1 [quant-ph] 13 Feb 2026

I. 引言

极性分子在众多应用领域展现出巨大潜力，包括基础物理的精密检验 [1, 2], 、量子计算与模拟 [3],以及超冷化学 [4]。分子丰富的内部结构和多样化的性质为这些应用带来了独特优势。强大的内部电场以及对分子取向的高度控制，是近期电子电偶极矩测量的关键；这些测量将违反时间反演对称性的新的物理学限制在约 40 TeV 以内 [5, 6]。分子具有各种电子、振动和转动跃迁，而这些跃迁对基本常数具有不同的敏感性。因此，分子钟有望用于高精度搜索随空间和时间变化的基本常数 [7, 8]。这些跃迁还覆盖广泛的频谱，包括电信频率和微波频率，为量子网络提供了巨大潜力[9]。分子的复杂内部结构还可用于高效编码量子信息。例如，单个分子可以在由大量稳定态构成的高维希尔伯特空间中编码量子位或纠错量子比特 [10, 11]„ 从而减少量子信息处理器中的物理量子比特数量。

所有这些应用都将受益于对大型系统中分子态及其相互作用的先进控制。这包括单分子的制备与读出，以及量子关联分子态（如自旋压缩态和多体纠缠态）的生成与控制，以实现量子增强精密测量和量子模拟。

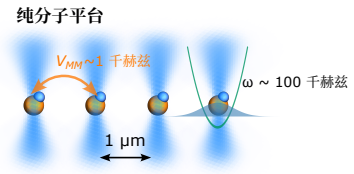
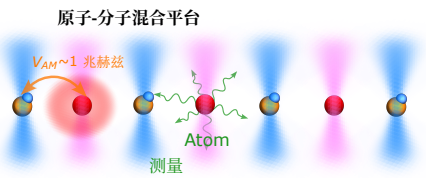
超冷分子作为量子平台正经历快速而显著的发展，包括冷却至量子简并 [12, 13], 数秒的相干时间 [14, 15], 将可重构光镊阵列装载到运动基态 [16, 17], 以及实现纠缠门 [18–21]。与中性原子平台相比，分子面临若干挑战；首先，态探测相对缓慢且不够完善。对于能够反复散射光子的分子，已在 30 毫秒内实现约 3% 的最低态探测误差 [22]。对于由原子组装而成的分子，态探测具有破坏性，其效率受解离过程限制，约为 3%[23]。这将限制大型系统中电路中途操作的性能，例如量子纠错和可扩展的多体纠缠生成。此外，相对较弱的偶极-偶极相互作用限制了纠缠门的速度，因而也限制了通过幺正电路或连续哈密顿量演化生成大型多体纠缠态的能力。实现长程纠缠的另一种方案是将电路中途测量与浅层幺正电路相结合 [24]。然而，分子的速度和读出效率限制了该方法的应用。

为应对这些挑战，我们在此提出一种由分子和原子构成的混合系统，它结合了分子在基础物理

* c.zhang@imperial.ac.uk

† ranf@tauex.tau.ac.il

表 I.纯分子平台与原子-分子混合平台在分子基础物理和量子技术应用方面的比较。

	纯分子平台	原子-分子混合平台
		
纠缠门时间	$\gtrsim 1$ 毫秒	~ 1 μ秒
连通性	仅限最近邻	通过原子实现长程
非破坏性测量	取决于物种	通过原子实现通用性
电路中读出	保真度低、速度慢（读出区或搁置）	借助原子实现快速、高保真
弱测量	具有挑战性	借助原子直接实现

和量子技术方面的优势结构，以及原子纯净的读出和控制能力。分子与原子之间的强相互作用可用于利用原子对分子进行量子逻辑控制。原子的快速、高保真度读出，加上原子与分子共振之间较大的谱分离，可支持基于辅助量子比特的中途操作，例如连续时钟 [25]，双正交测量 [26]，多量子比特奇偶校验 [24]，以及长程纠缠生成。分子平台与混合平台的比较见表 I。

本文其余部分安排如下。第二节回顾分子的控制、读出和纠缠方面的现有技术。第三节介绍新型混合平台的基本构件——分子-原子纠缠门。第四节提出一种基于测量的方案，用于生成极性分子的长程纠缠态；该方案旨在优于仅使用直接分子-分子纠缠门的方案。作为案例研究，我们重点介绍一项能够从所提方案中受益的具体应用，即精密测量和量子计量学。最后，第五节讨论这类混合系统的其他应用，包括利用基于测量的方案制备奇异拓扑序，以及探测和调控临界系统。

II. 超冷分子阵列中的纠缠

分子具有丰富的内部结构，其转动谱和超精细谱中有许多态适合用于编码量子信息。我们选择标记为 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$的两个态，它们通过电偶极跃迁相连，跃迁偶极矩为$\langle 1|\, d\, |2\rangle = d_{\mathrm{M}}$，其中 d是偶极算符。 $|1\rangle$ 和$|2\rangle$ 可以是该分子的不同转动能级。相距微米的两个分子主要通过偶极-偶极相互作用彼此作用。在 $\{|1\rangle, |2\rangle\}$ 基底中，两个分子之间的相互作用可描述为:

$$H_{\mathrm{MM}} = \frac{V_{\mathrm{MM}}}{2}\left(\sigma_1^x\sigma_2^x + \sigma_1^y\sigma_2^y\right), \tag{1}$$

其中， V_{MM} 是两个分子之间的相互作用强度， σ^x_1、σ^y_2、分别是第一和第二个分子在 $\{|1\rangle, |2\rangle\}$基底中的泡利矩阵。H_{MM} 实现了直接的自旋交换相互作用。量子比特可以编码在态 $|1\rangle$ 和另一种态 $|0\rangle$中，后者与$|1\rangle$不存在跃迁偶极矩。

分子之间通常采用两种纠缠门方案 [18]。第一种是iSWAP门，它利用了直接的自旋交换相互作用 [3]。两个分子分别初始化，其中一个处于 $|0\rangle$，另一个处于 $|1\rangle$。将态 $|0\rangle$ 映射到 $|2\rangle$后，两个分子开始相互作用。经过 $t = \pi/(2V_{\mathrm{MM}})$ 的相互作用时间后，两个分子在$\frac{1}{\sqrt{2}}$（$|12\rangle + i\,|21\rangle$）态中达到最大纠缠。通过将态 $|2\rangle$映射回 $|0\rangle$，可以关闭相互作用。还可以通过动态控制分子间距来控制相互作用时间，因为相互作用强度取决于距离。交换相互作用，尤其是 iSWAP门，最近已在实验中实现 [18–21]。

另一类纠缠门通过共振驱动 $|11\rangle \leftrightarrow |\Psi^+\rangle$之间的双体态跃迁，其中$|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|12\rangle + |21\rangle)$ 是偶极-偶极相互作用哈密顿量 H_{MM}的本征态。态 $|11\rangle$会拉比振荡至 $|\Psi^+\rangle$ ，再返回 $-|11\rangle$，并额外获得 π 相位。由于偶极-偶极相互作用导致 $|\Psi^+\rangle$发生能移，其他双体态 $|00\rangle$、$|01\rangle$和$|10\rangle$与驱动场非共振。这实现了一个受控相位门，并已在RbCs分子中得到实验验证 [18]。在这两种方案中，纠缠两个分子的门时间从根本上受相互作用强度限制；对于偶极矩为数德拜的分子，相互作用强度介于100 Hz和1 kHz之间，分子间距为

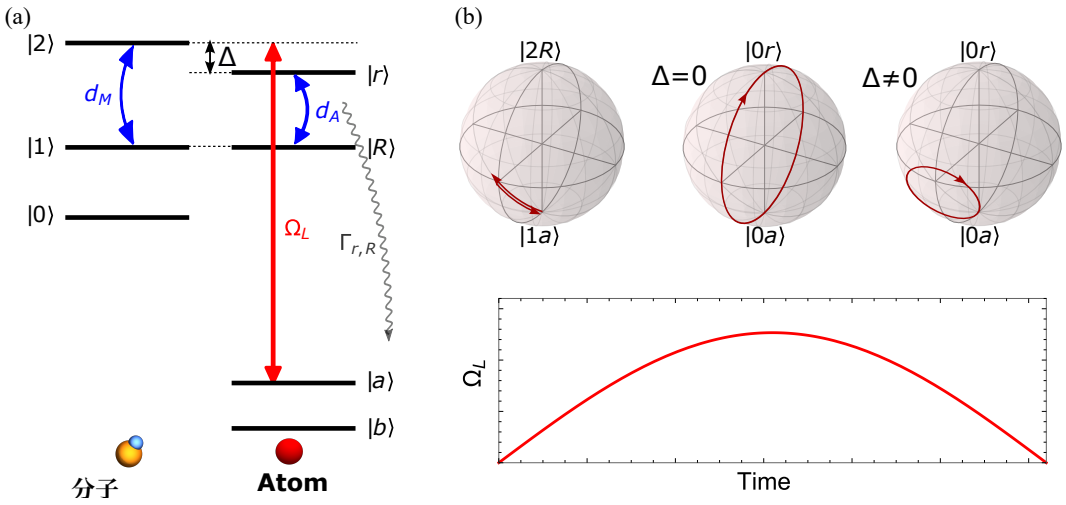


图 1. **分子与原子之间的受控相位门。(a)** $|0\rangle$、$|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 是分子态，$|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 通过电偶极跃迁相连。$|a\rangle$ 和 $|b\rangle$ 是低能原子态。$|r\rangle$ 和 $|R\rangle$ 是通过电偶极跃迁相连的原子里德堡态。$|r\rangle \leftrightarrow |R\rangle$ 的跃迁频率可通过电场调节至与 $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$近共振。激光场耦合 $|a\rangle \leftrightarrow |r\rangle$。**(b)** 门序列由施加于原子的正弦形激光脉冲组成。当 $\Delta = 0$ 且脉冲面积为 2π时，该门为受控 Z 门。最大耦合强度 $\Omega_{\mathrm{L,\ max}} \lesssim V_{\mathrm{MA}}$。对于初始处于 $|0a\rangle$的成对态，系统经拉比振荡到达 $|0r\rangle$ 后获得 π 相位（中间的布洛赫球）。对于 $|1a\rangle$，系统绝热地跟随本征态，并返回 $|1a\rangle$，不产生额外相位（左侧的布洛赫球）。激光不会耦合$|0b\rangle$ 和 $|1b\rangle$，它们保持在原态。当 $\Delta \neq 0$ 时，该门为受控任意相位门。对于初始处于 $|0a\rangle$的成对态，通过选择合适的脉冲形状，系统会发生非共振拉比振荡，并沿布洛赫球上的闭合回路返回 $|0a\rangle$（右侧的布洛赫球）。对于其他初始态，情况与$\Delta = 0$ 相似。

偶极矩为数德拜的分子相距 2 μ米。此外，偶极-偶极相互作用取决于距离，因此会使量子比特态与分子运动耦合。这种非预期的耦合会导致退相干和加热，而加热又会进一步引发退相干和加热。利用态依赖光镊可以将分子以更短的间距（∼100 纳米）囚禁 [27]，从而增强相互作用强度。然而，较小的分子间距也会加剧运动导致的退相干，因为运动波函数的展宽会造成相互作用强度更大的变化，从而限制快速纠缠门的性能。

为了扩大用于量子计量和量子模拟应用的纠缠分子数量，需要施加大量双分子门。由于相干时间有限，缓慢的门时间会限制电路深度。此外，非预期运动耦合导致的加热可能会限制连续施加门的数量。另一种方法是借鉴基于测量的量子计算技术，利用固定深度浅层电路制备长程多体纠缠；这类技术需要高保真度的电路中读出 [28–34]。对于 CaF 和 RbCs 等囚禁分子，这主要受 3% 的读出误差限制 [22, 23]。相比之下，在下一节中，我们将展示基于测量的方法在原子与分子的混合平台中可以非常高效。

III. 用于量子逻辑操作的原子-分子门

为应对分子纠缠和读出的挑战，我们提出一种由原子和分子构成的混合系统，在其中种间门可以快得多，读出误差也可以大幅降低。量子逻辑光谱学是一种强大的技术，最初在离子阱中开发 [9, 35]。它通过辅助离子，无需直接读出目标离子，也无需使目标离子发生光子散射，即可实现目标离子量子态的读出和控制。该方法依赖于不同离子种类之间由声子介导的相互作用，普遍适用于任何离子种类，包括分子离子 [9]。这种方法为离子阱中的广泛应用铺平了道路，涵盖从原子钟 [36]，到基础物理的精密检验 [37]，以及量子信息处理 [35]。

在此，我们提出一种利用里德伯原子对中性分子进行量子逻辑光谱学的方案。我们方法的关键要素是分子与原子之间的纠缠门，以及基于原子辅助量子比特的读出。我们进一步将这一思路从光谱学拓展到测量诱导生成长程纠缠态。图 1 展示了基本原理。我们选取两个原子态 $|a\rangle$和 $|b\rangle$来编码原子量子比特。$|a\rangle$ 通过激光场 Ω_{L}与里德伯态 $|r\rangle$ 耦合。另一个里德伯态 $|R\rangle$ 通过跃迁偶极矩 d_{A}与 $|r\rangle$耦合。两者之间的跃迁

$|r\rangle \leftrightarrow |R\rangle$ 可通过施加一个较小的电场，调谐至与分子跃迁 $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 共振。随后，双体态 $|1r\rangle$和 $|2R\rangle$ 通过偶极-偶极相互作用耦合

$$H_{\mathrm{MA}} = \frac{V_{\mathrm{MA}}}{2}\left(|1r\rangle\langle 2R| + |2R\rangle\langle 1r|\right) + \Delta\,|2R\rangle\langle 2R|\,, \quad (2)$$

其中， Δ是双体态 $|1r\rangle$与 $|2R\rangle$之间的失谐。由于里德伯态具有较大的偶极矩（$d_A \gtrsim 1000 d_M$），在相近间距下， V_{MA} 通常至少比 V_{MM} 大三个数量级。因此，它可以产生类似于里德伯阻塞的效应：原子激发可根据分子所处的状态 [38]而受到抑制。图 1 展示了将这一效应转化为分子-原子受控 Z 门的脉冲序列。我们将跃迁 $|r\rangle \leftrightarrow |R\rangle$和 $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 调至共振（$\Delta = 0$）。对原子施加最大拉比频率为 $\Omega_{\mathrm{L,\ max}} \lesssim V_{\mathrm{MA}}$且脉冲面积为 2π 的正弦形激光脉冲。双体态 $|0a\rangle$ 经过 $|0r\rangle$中的一次拉比振荡后，获得一个几何 π 相位。对于 $|1a\rangle$，系统绝热地跟随本征态，并返回 $|1a\rangle$，不会产生额外相位。激光不会耦合 $|0b\rangle$ 和 $|1b\rangle$，因此它们保持不变。由此实现了原子与分子之间的受控 Z 门。

同一序列也可用于实现一般的任意受控相位门。利用电场控制， $|r\rangle \leftrightarrow |R\rangle$的跃迁频率相对于 $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 偏移了 $\Delta \lesssim V_{\mathrm{MA}}$。 $|a\rangle \leftrightarrow |r\rangle$耦合激光也失谐了 Δ。门序列仍为平滑变化的激光脉冲。对于初始双体态 $|0a\rangle$，拉比振荡处于非共振状态。通过选择适当的脉冲面积，可以实现任意相位。由此实现了受控任意相位门。

原子-分子门误差预算

表 II 列出了并计算了 CaF 和铷的原子-分子门误差来源。该门的机制与参考文献 [38] 中由里德伯原子介导的双分子门类似。因此，门错误采用相同的方法计算。该门可选用多种原子态和分子态。为具体说明，这里我们选择 $|0\rangle = |N=1,\ F=0,\ M=0\rangle$ (N, F, M分别为转动、超精细和磁量子数)、$|1\rangle = |N=0,\ F=0,\ M=0\rangle$以及 $|2\rangle = |N=1,\ F=1^-,\ M=1\rangle$ (其中 F 中的上标表示该态的宇称) 作为 CaF 的态，并选择 $|r\rangle = \left|59s_{1/2},\ F=1,\ M=-1\right\rangle$ 和 $|R\rangle = \left|58p_{3/2},\ F=2,\ M=-2\right\rangle$ 作为铷的态。需要注意的是，门错误几乎不受具体态选择的影响，主要取决于分子的转动常数和偶极矩。主要误差来源包括里德伯态衰减、非绝热态 $|1a\rangle$的跃迁、计算子空间之外其他原子态和分子态产生的不希望出现的相互作用，以及电场控制不完善导致的分子跃迁与里德伯跃迁之间的静态失谐。

IV. 基于测量的制备大规模分子 GHZ 态

现在我们将说明如何利用此类分子-原子门，通过一种有望比仅使用直接分子-分子门的量子酉电路更高效的方案，制备大规模分子纠缠态。我们建议结合第 III 节介绍的高保真度原子-分子门与高保真度原子态探测（相较于分子态探测），以扩展分子纠缠态的规模。我们着重关注在量子传感和探索基本物理方面具有优势的态，例如格林伯格-霍恩-蔡林格（GHZ）态；它能够使对分子中基本对称性破缺的测量精度超越标准量子极限，同时降低对外场噪声的敏感性 [39]。

我们的方案基于基于测量的量子计算领域中一个广为人知的方案 [40]。该方案近期在具备电路中途测量能力的物质基量子处理器中长程纠缠态制备的背景下引起了广泛关注 [28–34]。该方案（图 2）由两部分组成：利用浅层电路生成一维簇态，并在原子子晶格上进行 X 基测量。随后，剩余未测量的分子量子比特会被投影到一个定义明确的猫态，该猫态与原子的测量结果相关联；再根据原子测量结果执行单量子比特旋转，作为前馈层，即可将其转换为 GHZ 态。可通过聚焦双光子激光束，或通过全局微波场配合改变光镊功率所诱导的局域光移，来选择量子比特。

该方案为制备长程纠缠态提供了一条清晰的捷径，尤其适用于制备 GHZ 态；GHZ 态是局域相位估计的最优输入态，可用于量子计量学。然而，该方案的态制备保真度取决于电路中途测量的保真度、簇态制备保真度，以及分子量子比特的相干时间。应将这些因素与更大电路深度下的保真度进行比较；对于仅使用门操作的方案，其门数量随 N 或 log(N) 增长。我们认为，所提出的系统是特别适合采用这种基于测量的方法的平台，且短期内有望带来优势，因为原子-分子混合系统固有的优势与基于测量的方案天然契合。

如第 III 节所述，尽管直接分子

表 II. **门错误及其与分子性质的标度关系**。 相互作用强度 $V_{\mathrm{MA}} \propto d_A d_M \propto n^2 d_M$，其中 n 为主量子数。里德伯态的选择取决于分子种类；里德伯能级间隔$\propto n^{-3}$ 需要与分子的转动频率 f 大致匹配，从而使它们能够在较小电场下调谐至共振。激光耦合强度通常为几兆赫兹，选择该强度是为了优化衰减误差和非绝热误差（参见文献 [38]）。因此，所有这些误差都取决于分子的转动频率和偶极矩。假定失谐来源于电场波动 ~ 0.1 mV/cm时里德伯原子的斯塔克位移。

误差来源	标度关系	CaF 和铷的误差
里德伯态衰减	$f^{3/2} d_M^{-1}$	7×10^{-4}
绝热性破坏	-	2.5×10^{-4}
量子比特子空间泄漏	$f^{-10/3} d_M^2$	5×10^{-8}
电场涨落	$f^{10/3} d_M^{-2}$	8×10^{-5}
总误差	-	1×10^{-3}

尽管分子门已取得长足进展，但其速度仍然受限（原因是相互作用能相对较低），这通常会限制其保真度。此外，如何高保真地读出分子态一直是一项长期挑战。另一方面，原子-分子混合系统可以利用原子的优势，例如快速、高保真度的读出以及快速、高保真度的混合原子-分子门，从而改进分子 GHZ 态制备。

V. 混合原子-分子门的其他应用

利用高维编码制备奇异拓扑序

分子拥有种类繁多且稳定的能级，因此天然适合使用 d能级或量子位来编码量子信息。在测量诱导物态的背景下，三能级系统或量子三能级系统尤其值得关注。原子与分子之间的量子三能级纠缠门可作为我们在第三节介绍的原子-分子门的扩展来实现。这一扩展基于近期提出的一种用于中性原子的量子三能级纠缠门方案，该方案由一系列交替的受控相位门和单量子三能级旋转组成，其中受控相位门最多作用于两个里德堡能级 [41]。

因此，要在我们提出的平台上实现量子三能级门，只需在分子和原子中各增加一个稳定能级，并能够对每种物种执行单量子三能级旋转；只要向新引入的能级增加一个耦合场，也能轻松实现这一点。采用量子三能级编码，并结合原子辅助量子比特进行电路中途测量，可通过对量子三能级簇态进行测量和前馈，高效制备量子三能级 GHZ 态的基态以及 $\mathbb{Z}_3$ 托里克码。

$\mathbb{Z}_3$ 托里克码还可进一步用作资源态，以制备 S_3 量子双模型。S_3 是最小的非阿贝尔群，并可实现通用的拓扑保护量子计算。要通过基于测量的方式生成这种拓扑序，需要能够在$\mathbb{Z}_3$ 簇态与另一组制备于 $\mathbb{Z}_2$ 簇态中的量子比特之间执行门操作，随后进行一轮测量和前馈 [30, 34, 42]。值得注意的是，这种应用结合了分子中量子比特编码固有的优势，同时克服了分子系统面临的挑战，例如低保真度测量和直接纠缠门。因此，我们预见，这类应用将成为一种有前景的方案，可用于观察基于测量的态制备以及生成此类非阿贝尔拓扑序方面的真正优势。

测量改变的临界性

结合分子与原子的混合平台，为在多体量子系统的基态上实施弱测量提供了一条很有前景的途径 [43]。这类系统可编码在分子自由度中，从而能够构造多种自旋模型。例如，XXZ 自旋链模型，

$$H = -\sum_j [X_j X_{j+1} + Y_j Y_{j+1} + \Delta Z_j Z_{j+1}], \qquad (3)$$

如参考文献 [44, 45] 所示，可利用偶极相互作用实现。除了基于量子位的模型，分子系统还可以实现更大的局域希尔伯特空间维数。例如，可利用编码在分子三个内部态中的量子三能级系统来构造三态波茨模型，其哈密顿量为

$$H = -\sum_j \left(J U_j U_{j+1}^\dagger + J U_j^\dagger U_{j+1} + h(V_j + V_j^\dagger) \right), \quad (4)$$

其中现场算子为

$$V_j = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i2\pi/3} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i4\pi/3} \end{pmatrix}, \quad U_j = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \qquad (5)$$

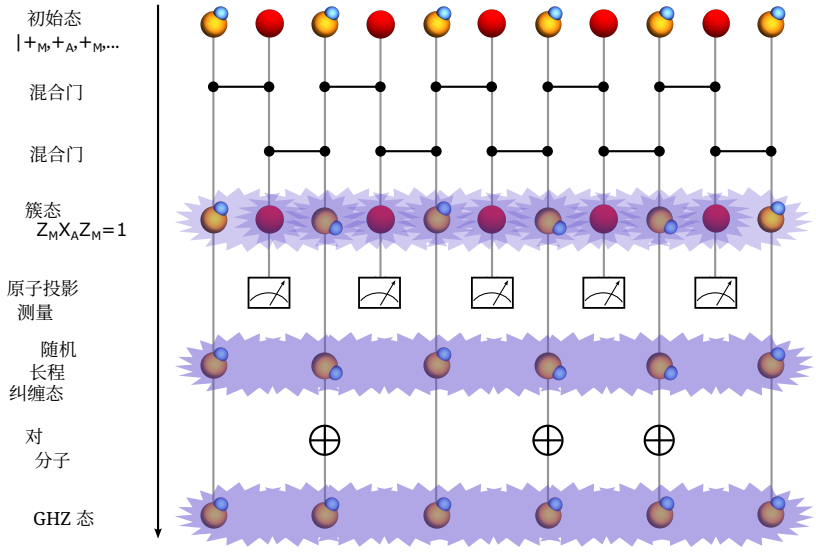


图 2. **利用原子辅助量子位和测量生成分子的长程纠缠态**。所有原子和分子均初始化为 $|+\rangle$（原子为 $|\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle \pm |1\rangle)$，分子为 $|\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|a\rangle \pm |b\rangle)$）。首先移动原子，使其与左侧的分子纠缠，随后再与右侧的分子纠缠。由此生成簇态。接着，对所有原子进行 $|\pm\rangle$ 基测量。分子子系统被投影到一个与原子态相关联的长程纠缠态。根据原子的测量结果，可以通过单分子旋转将分子态旋转到目标长程纠缠态（例如 GHZ 态）。

通过用微波场对三个转动态进行缀饰，使三个状态之间的偶极允许跃迁强度相等，即可在分子三能级量子系统中实现这一哈密顿量。通过调节比值 J/h，该哈密顿量的基态会在有序相与无序的 Z_3 对称性破缺相之间连续变化。我们关注自对偶点 $J = h$，此时系统会经历三态Potts普适类 [46]中的连续相变。在这种设置下，原子充当辅助系统，更易于制备和测量。由此可以通过以下方案实现弱测量协议：

1.**制备**：将分子初始化为临界自旋模型的基态，例如式 (3) 或 (4) 的基态）。在模拟量子模拟器设置中，通过对哈密顿量参数进行绝热扫描，可以制备基态。或者，也可以利用线性深度电路制备式 (3) 和 (4) 的基态，电路中使用直接的分子-分子门 [18, 20, 21] 或由原子介导的门 [38]。数字电路方法还可以结合变分优化算法，以及针对系统每种规模显式优化的电路 [47, 48]。原子初始化为某种状态，可以是简单的直积态，也可以是纠缠态。

2. **纠缠门**：按照第三节中的方案对原子-分子对施加受控相位门。通过施加小幅度的受控相位门，可以实现弱测量状态，

我们预计，由于其持续时间可以非常短，因此能够以极高的保真度实现。

3.**测量**：原子和分子一旦建立关联，对原子自由度的测量便会在分子系统上诱导出一种有效测量。通过相应地制备辅助系统，可以偏置测量统计，从而提高后选择所需测量结果的成功概率。

为进一步说明最后一点，例如，在文献 [49], 中，临界系统和辅助系统都取为横场伊辛模型。通过将辅助系统置于顺磁相，即使系统尺寸很大，只需出乎意料地少量重复实验，就能后选择均匀（最可能的）测量结果。这种高效性源于辅助系统的测量结果遵循强烈偏置的概率分布。

近期的方案表明，无需辅助系统即可在单条里德堡链中观测到测量改变的临界性（例如通过部分测量方案），并提高后选择的概率 [50]。分子-原子架构的主要优势在于，它们能够拓展可实现模型和测量通道的范围。特别是，尽管要为伊辛情形之外的临界理论找到最优测量方案仍需进一步研究，但使用纠缠辅助系统为制备具有长程关联且纠缠可调的后选择态打开了大门。实现波茨临界点将

为实验探究多体态中的测量诱导效应与非平凡重整化群流之间的联系开辟一条途径 [51]。

VI. 总结与展望

我们提出了一种由分子和原子构成的混合平台，以显著推进极性分子的量子逻辑控制和纠缠。在该系统中，分子可用作基础物理研究的量子传感器、用于量子模拟的量子比特和量子位，以及受控化学的基本组成单元。里德堡原子通过偶极-偶极相互作用与分子相互作用。这种相互作用能够快速、高精度地控制分子的内部态，并实现电路中读出。它还推动了对多体分子系统的操控；例如，可以通过电路中操作生成远程纠缠，并通过基于辅助量子位的弱测量探测多体关联。该平台将分子固有的复杂性和多功能性，与原子的高保真控制、测量和纠缠能力相结合。值得注意的是，多种分子和原子的共同囚禁最近已在实验中实现 [52–55]。我们的工作可指导此类近期实验的设计，因为其广泛适用于各种极性分子，并将在不久的将来推动分子量子技术中的多种应用。

注——在完成本研究期间，我们了解到一项相关研究，该研究利用里德伯原子对分子进行非破坏性测量 [56]。

致谢

我们感谢 Manuel Endres 和 Nick Hutzler 在本研究早期阶段提出的富有见地的建议并参与讨论。我们感谢 Lewis Picard 对本文提出的宝贵意见。我们感谢加州理工学院 Walter Burke 理论物理研究所提供的支持。本研究得到了以色列科学基金会研究基金（ISF 编号：4098/25）和迈蒙尼德基金未来科学家中心的支持。RF 在加州理工学院工作期间获得了 Troesh博士后奖学金的支持。CZ 获得了加州理工学院 David and Ellen Lee博士后奖学金的支持。SM 感谢 Jason Alicea、Yue Liu、Nandagopal Manoj、Stephen Naus 和 Pablo Sala 就相关主题进行的讨论与合作。

[1] M. S. Safronova、D. Budker、D. DeMille、D. F. J. Kimball、A. Derevianko 和 C. W. Clark, 《利用原子和分子寻找新物理》, Rev. Mod. Phys. **90**, 025008 (2018). [2] D. DeMille、N. R. Hutzler、A. M. Rey 和 T. Zelevinsky, 《利用分子进行基础物理的量子传感与计量学》, 《自然·物理》**20**, 741 (2024年). [3] S. L. Cornish、M. R. Tarbutt 和 K. R. A. Hazzard, 《利用超冷分子进行量子计算与量子模拟》, 《自然·物理》**20**, 730 (2024年). [4] T. Karman、M. Tomza 和 J. P´erez-R´ıos, 《超冷化学作为少体物理的试验平台》, 《自然·物理》**20**, 722 (2024年). [5] V. Andreev、D. G. Ang、D. DeMille、J. M. Doyle、G. Gabrielse、J. Haefner、N. R. Hutzler、Z. Lasner、C. Meisenhelder、B. R. O'Leary、C. D. Panda、A. D. West、E. P. West 和 X. Wu, 《电子电偶极矩的改进限值》, 《自然》**562**, 355 (2018). [6] T. S. Roussy、L. Caldwell、T. Wright、W. B. Cairncross、Y. Shagam、K. B. Ng、N. Schlossberger、S. Y. Park、A. Wang、J. Ye 和 E. A. Cornell, 《电子电偶极矩的改进界限》, 《科学》**381**, 46 (2023年). [7] S. Truppe、R. J. Hendricks、S. K. Tokunaga、H. J. Lewandowski、M. G. Kozlov、C. Henkel、E. A. Hinds 和 M. R. Tarbutt, 《利用冷 CH 的赫兹级频率测量搜寻变化的基础常数》, Nat. Commun.**4**, 2600 (2013). [8] K. H. Leung、B. Iritani、E. Tiberi、I. Majewska、M. Borkowski、R. Moszynski 和 T. Zelevinsky, 《Tera-系统不确定度达到 10^{-14} 量级的赫兹振动分子钟，Phys. Rev. X**13**, 011047 (2023)。[9] Y. Lin, D. R. Leibrandt, D. Leibfried, and C.-w. Chou, 《原子与分子之间的量子纠缠》, 《自然》**581**, 273 (2020)。[10] R. Sawant, J. A. Blackmore, P. D. Gregory, J. Mur-Petit, D. Jaksch, J. Aldegunde, J. M. Hutson, M. R. Tarbutt, and S. L. Cornish, 《超冷极性分子作为量子位》, New J. Phys. **22**, 013027 (2020)。[11] V. V. Albert, J. P. Covey, and J. Preskill, 《分子中量子比特的稳健编码》, Phys. Rev. X **10**, 031050 (2020)。[12] N. Bigagli, W. Yuan, S. Zhang, B. Bulatovic, T. Karman, I. Stevenson, and S. Will, 《偶极分子玻色–爱因斯坦凝聚的观测》, 《自然》**631**, 289 (2024), 出版商：Nature Publishing Group。[13] L. D. Marco, G. Valtolina, K. Matsuda, W. G. Tobias, J. P. Covey, and J. Ye, 《极性分子的简并费米气体》, 《科学》**363**, 853 (2019)。[14] P. D. Gregory, J. A. Blackmore, S. L. Bromley, J. M. Hutson, and S. L. Cornish, 《超冷极性分子中的稳健存储量子比特》, 《自然·物理》**17**, 1149 (2021)。[15] P. D. Gregory, L. M. Fernley, A. L. Tao, S. L. Bromley, J. Stepp, Z. Zhang, S. Kotochigova, K. R. A. Hazzard, and S. L. Cornish, 《超冷极性分子气体中的秒级转动相干性与偶极相互作用》, 《自然·物理》**20**, 415 (2024), 出版商：Nature Publishing Group。[16] Y. Lu, S. J. Li, C. M. Holland, and L. W. Cheuk, 《光镊阵列中分子的拉曼边带冷却》, 《自然·物理》**20**, 389 (2024), 出版商：Nature

出版集团。[17] Y. Bao, S. S. Yu, J. You, L. Anderegg, E. Chae, W. Ketterle, K.-K. Ni, and J. M. Doyle, 《光镊阵列中的分子经拉曼边带冷却至三维运动基态》, Phys. Rev. X **14**, 031002 (2024)。[18] D. K. Ruttley, T. R. Hepworth, A. Guttridge, and S. L. Cornish, 《魔术波长光镊中分子的长寿命纠缠》, 《自然》, **1** (2025)。[19] Y. Bao, S. S. Yu, L. Anderegg, E. Chae, W. Ketterle, K.-K. Ni, and J. M. Doyle, 《光镊阵列中分子间的偶极自旋交换与纠缠》, 《科学》**382**, 1138 (2023)。[20] C. M. Holland, Y. Lu, and L. W. Cheuk, 《可重构光镊阵列中分子的按需纠缠》, 《科学》**382**, 1143 (2023)。[21] L. R. B. Picard, A. J. Park, G. E. Patenotte, S. Gebretsadkan, D. Wellnitz, A. M. Rey, and K.-K. Ni, 《分子量子比特间的纠缠与 iSWAP 门》, 《自然》**637**, 821 (2025), 出版商：Nature Publishing Group。[22] C. M. Holland, Y. Lu, and L. W. Cheuk, 《光镊阵列中单分子的双色成像》, Physical Review Letters**131**, 053202 (2023)。[23] D. K. Ruttley, A. Guttridge, T. R. Hepworth, and S. L. Cornish, 《利用光镊阵列增强对单个超冷分子的量子控制》, PRX Quantum **5**, 020333 (2024)。[24] R. Finkelstein, R. B.-S. Tsai, X. Sun, P. Scholl, S. Direkci, T. Gefen, J. Choi, A. L. Shaw, and M. Endres, 《光镊钟的通用量子操作与基于辅助量子比特的读出》, 《自然》**634**, 321 (2024), 出版商：Nature Publishing Group。[25] X.-Y. Liu, P. Liu, J. Li, Y.-C. Zhang, Y.-B. Wang, Z.-P. Jia, X. Zhang, X.-Q. Zhu, D.-Q. Kong, W.-L. Song, G.-Z. Niu, Y.-M. Yang, P.-J. Feng, X.-P. Liu, X.-Y. Cui, P. Xu, X. Jiang, J. Yin, S.-K. Liao, C.-Z. Peng, H.-N. Dai, Y.-A. Chen, and J.-W. Pan, 《稳定度达到 10^{-19} 量级的零死时间锶晶格钟》, Physical Review Letters **135**, 263402 (2025)。[26] A. L. Shaw, R. Finkelstein, R. B.-S. Tsai, P. Scholl, T. H. Yoon, J. Choi, and M. Endres, 《通过编程控制局域旋转并移动原子实现多系综计量》, 《自然·物理》**20**, 195 (2024)。[27] L. Caldwell and M. R. Tarbutt, 《利用态依赖光镊势阱增强分子间的偶极相互作用》, Physical Review Letters **125**, 243201 (2020)。[28] R. Raussendorf, S. Bravyi, and J. Harrington, 《含噪簇态中的长程量子纠缠》, Phys. Rev. A **71**, 062313 (2005)。[29] L. Piroli, G. Styliaris, and J. I. Cirac, 《局域操作与经典通信辅助的量子电路：物质相的变换与相》, Physical Review Letters **127**, 220503 (2021)。[30] R. Verresen, N. Tantivasadakarn, and A. Vishwanath, 《在量子器件中高效制备薛定谔猫态、分形子与非阿贝尔拓扑序》, arXiv:2112.03061 (2022)。[31] N. Tantivasadakarn, R. Thorngren, A. Vishwanath, and R. Verresen, 《通过测量对称性保护拓扑相获得长程纠缠》, Phys. Rev. X **14**, 021040 (2024)。[32] J. Y. Lee, W. Ji, Z. Bi, and M. P. A. Fisher, 《解码测量制备的量子相与相变：从伊辛模型到规范理论及其他》, arXiv:2208.11699 (2022)。[33] G.-Y. Zhu、N. Tantivasadakarn、A. Vishwanath、S. Trebst 和 R. Verresen, 《西村猫：由有限深度酉变换和弱测量产生的稳定长程纠缠》, Physical Review Letters **131**, 200201 (2023)。[34] N. Tantivasadakarn、A. Vishwanath 和 R. Verresen, 《由有限深度酉变换、测量和前馈产生的拓扑序层级》, PRX Quantum **4**, 020339 (2023)。[35] T. R. Tan、J. P. Gaebler、Y. Lin、Y. Wan、R. Bowler、D. Leibfried 和 D. J. Wineland, 《囚禁离子量子比特的多元素逻辑门》, 《自然》**528**, 380 (2015), 出版商：Nature Publishing Group。[36] M. C. Marshall、D. A. R. Castillo、W. J. Arthur-Dworschack、A. Aeppli、K. Kim、D. Lee、W. Warfield、J. Hinrichs、N. V. Nardelli、T. M. Fortier、J. Ye、D. R. Leibrandt 和 D. B. Hume, 《具有 5.5×10^{-19} 系统不确定度的高稳定度单离子钟》, Physical Review Letters **135**, 033201 (2025)。[37] Y. Zhou、J. O. Island 和 M. Grau, 《环形离子阱中分子离子的量子逻辑控制与精密测量：检验基本对称性的一种方法》, Phys. Rev. A **109**, 033107 (2024)。[38] C. Zhang 和 M. Tarbutt, 《分子与里德伯原子混合阵列中的量子计算》, PRX Quantum**3**, 030340 (2022)。[39] C. Zhang、P. Yu、A. Jadbabaie 和 N. R. Hutzler, 《利用无退相干子空间实现分子对称性破缺的量子增强计量学》, Physical Review Letters**131**, 193602 (2023)。[40] H. J. Briegel 和 R. Raussendorf, 《相互作用粒子阵列中的持久纠缠》, Physical Review Letters **86**, 910 (2001)。[41] A. Burshtein、S. Fraenkel、M. Goldstein 和 R. Finkelstein, 《中性原子阵列中量子位的鲁棒控制与纠缠》, Physical Review Research **8**, 013055 (2026)。[42] C. F. B. Lo、A. Lyons、D. Gresh、M. Mills、P. E. Siegfried、M. D. Urmey、N. Tantivasadakarn、H. Dreyer、A. Vishwanath、R. Verresen 等, 《在量子硬件上通过任意子的编织与融合实现通用拓扑门》, arXiv电子印本, arXiv (2026)。[43] S. J. Garratt、Z. Weinstein 和 E. Altman, 《测量通过非局域协同作用重构临界量子态》, Phys. Rev. X **13**, 021026 (2023)。[44] A. Micheli、G. K. Brennen 和 P. Zoller, 《极性分子晶格自旋模型工具箱》, Nature Phys. **2**, 341 (2006)。[45] R. R. S. C. A. M. D. A. H. Z. Z. Y. Lysander Christakis、Jason S. Rosenberg 和 W. S. Bakr, 《探测超冷分子自旋系统中的位点分辨关联》, 《自然》**614**, 64 (2023)。[46] A. A. Belavin、A. M. Polyakov 和 A. B. Zamolodchikov, 《二维量子场论中的无限维共形对称性》, Nucl. Phys. B **241**, 333 (1984)。[47] W. W. Ho 和 T. H. Hsieh, 《非平凡量子态的高效变分模拟》, SciPost Phys. **6**, 029 (2019)。[48] D. Rogerson 和 A. Roy, 《利用张量网络态的可微编程优化量子线路》, arXiv预印本 arXiv:2408.12583 (2024)。[49] S. Murciano、P. Sala、Y. Liu、R. S. K. Mong 和 J. Alicea, 《测量改变的伊辛量子临界性》, Phys. Rev. X **13**, 041042 (2023)。[50] S. Naus、Y. Liu、S. Murciano、P. Sala、M. Endres 和 J. Alicea

（ 2025 2506 21963 ）， [ ]
arXiv： . 量子物理. [51] Y. Liu、S. Murciano、D. F. Mross 和 J. Alicea，《对无能隙量子态进行单轮测量引发的边界相变》，Physical Review Research **7**，023293（2025年）。[52] A. Guttridge、D. K. Ruttley、A. C. Baldock、R. Gonz´alez- F´erez、H. R. Sadeghpour、C. S. Adams 和 S. L. Cornish，《观测到原子与极性分子间电荷-偶极相互作用导致的里德堡阻塞》（2023年）。[53] L. Zhu、J. Luke、R. Shaham、Y.-X. Liu 和 K.-K. Ni，《探测里德伯原子与超冷极性分子间的偶极相互作用》，Physical Review Letters **135**，153001（2025年）。

[54] S. Jurgilas, A. Chakraborty, C. J. H. Rich, L. Caldwell, H. J. Williams, N. J. Fitch, B. E. Sauer, M. D. Frye, J. M. Hutson, and M. R. Tarbutt, 超冷分子与磁阱中原子之间的碰撞，Physical Review Letters **126**, 153401 (2021). [55] S. Jurgilas, A. Chakraborty, C. J. H. Rich, B. E. Sauer, M. D. Frye, J. M. Hutson, and M. R. Tarbutt, 分子与原子的双物种磁光阱中的碰撞，New J. Phys. **23**, 075004 (2021). [56] J. T. Young, K.-K. Ni, and A. V. Gorshkov, 利用里德伯原子同时对多个极性分子进行非破坏性测量，arXiv预印本 arXiv:2601.08921 (2026).