arXiv:2601.01263v1 [quant-ph] 3 Jan 2026

使用 IBM Heron 2 量子处理器模拟维格纳局域化：原理验证基准测试研究

Airat Kiiamov[1] 和 Dmitrii Tayurskii[1]
[1] *Kazan Federal University, 420008, Kazan, Russia**（日期：2026年1月6日）

我们报告了使用最先进的**IBMHeron2** 量子处理器的一个6量子比特片段，对准一维（准1D）电子系统中的维格纳局域化进行的高保真数字量子模拟。通过将库仑相互作用哈密顿量映射到一个6量子比特环形晶格上，我们重构了双电子维格纳二聚体在 $U \in [5, 75]$ 范围内十五个相互作用区间中的基态能量景观。本研究是一项严格的**基准测试**工作，将最初为液氦上电子开发的基础实验模型拓展至现代量子计算领域。借助 Heron 2 增强的门保真度和可调耦合器架构，我们证明数字量子模拟能够准确捕捉与维格纳二聚体形成相关的能量最小化趋势，在强相互作用极限下相对误差低于 7%。我们的结果为使用超导量子硬件高精度探测强关联物质相提供了关键的**原理验证**，并为未来开展超越经典极限的模拟奠定了基准。

引言

对维格纳局域化的研究——即电子系统自发转变为空间有序构型的过程——代表了凝聚态物理中最基础且长期存在的挑战之一。尤金·维格纳于1934年首次提出这一现象；在低密度区域，粒子之间相互产生的库仑排斥超过其动能时，便会发生这一现象。在此类系统中，相态由排斥势能与量子零点涨落所产生的去局域化作用之间的竞争所决定。当排斥作用足够强时，电子会克服自身的动能，形成一种空间周期性构型，即维格纳晶体；而在少粒子系统中，则称为维格纳分子。尽管这类相变的理论框架已十分成熟，但由于传统半导体平台中无处不在的无序和杂质，要在“洁净”环境中实验观测到这种状态仍然极其困难。

从历史上看，最纯净的维格纳系统实验实现，是通过将电子束缚在液氦表面来实现的。与半导体异质结构不同，后者的电子输运不可避免地受到晶格缺陷和界面粗糙度的阻碍；而在低于 1 K 的温度下，液氦表面原子级平滑，几乎不存在无序。这为观测准一维（quasi-1D）电子气中的关联驱动现象提供了一个“纯净”的实验室。通过使用微通道器件，研究人员可以精确控制电子系统的几何形状，使其进入电子行数受限的区域，从而得以研究高度受限条件下的集体动力学和结构有序，受应变的环境。

现代研究的一个核心主题，是这些系统从经典静电描述向完全量子力学描述的转变。在传统的低密度极限下，电子间的典型距离较大（例如，$\sim 0.5\ \mu m$），维格纳系统通常可以用经典力学和分子动力学（MD）模拟准确建模。然而，当电子被限制在日益狭小的几何结构中——例如在微通道中研究的**电子二聚体** 构型——经典近似便不再充分。随着电子间特征距离缩短，波函数重叠、隧穿动力学和零点涨落等量子现象随之出现，从根本上重新定义了能量景观以及局域相的稳定性。

数字量子模拟（DQS）为探究这些强关联区域提供了一种颇具前景的替代方案。本文所 प्रस्तुत的研究定位于新兴的**量子效用和基准测试**框架之中。随着**IBM Heron 2** 处理器的推出，以及可调耦合器和更高的门保真度，我们已经进入这样一个时代：量子硬件能够高精度地模拟物理模型。我们的六位点模型是新一代硬件的重要**原理验证**测试平台。尽管维数为 15 的希尔伯特空间可以通过精确对角化在经典计算机上求解，但这种可处理性是我们基准测试策略中的有意设计。通过将硬件结果与精确数值解进行比较，我们可以严格评估 Heron 2 架构的性能，尤其是其处理长程关联和抑制串扰的能力，然后再扩展到更大且经典计算难以处理的晶格。这种方法确保数字模拟能够忠实复现液

氦实验中确立的基础物理规律，然后再进入量子优势区域。

方法

为弥合连续系统与数字模拟之间的差距，我们对一个受限于**双电子二聚体**和**六位点环**的系统进行建模。该设置既捕捉了先前研究所揭示的结构有序的核心物理特征，又通过周期性边界条件消除了边缘效应。选择 $M = 6$ 个位点容纳 $N_e = 2$ 个电子，可得到维度为 $\binom{6}{2} = 15$ 的希尔伯特空间，从而能够与经典精确对角化进行明确的**基准测试比较**。

哈密顿量形式

系统由一个映射到具有周期性边界条件的六位点晶格上的二次量子化哈密顿量描述：

$$\hat{H} = \underbrace{-t \sum_{i=0}^{M-1} (\hat{a}_i^\dagger \hat{a}_{i+1} + \text{h.c.})}_{\hat{H}_{\text{kin}}} + \underbrace{\sum_{i<j} V_{ij} \hat{n}_i \hat{n}_j}_{\hat{H}_{\text{int}}} \qquad (1)$$

ˆ 其中 $M = 6$。动能项 H_{kin} 表示位点间的隧穿，有利于形成离域态。相互作用项 H_{int} 至关重要；与仅考虑最近邻相互作用的模型不同，我们的哈密顿量涵盖所有位点对之间完整的**长程库仑势分布**。纳入这些长程“尾部”对于准确捕捉驱动维格纳二聚体形成的静电能量景观至关重要。

势能 $V_{ij} = U/r_{ij}$ 使用单位圆上的**弦长距离** r_{ij} 计算：

$$r_{ij} = \frac{M}{\pi} \sin\left(\frac{\pi |i-j|}{M}\right) \qquad (2)$$

通过考虑所有位点之间的相互作用，该模型准确反映了集体排斥效应；在强相互作用极限下，这种排斥会使电子呈对跖排列。

变分量子本征求解器与硬件执行

基态能量 $E_G(U)$ 通过 VQE 在经过策略性选择的**IBM Heron 2**处理器的六量子比特子寄存器上确定。变分任务通过 **COBYLA** 算法进行优化。为确保模拟反映物理现实，我们实施了一套强有力的误差缓解协议。我们采用**零噪声外推（ZNE）**缩放噪声因子，并估算无噪声极限下的能量；同时将**动态解耦（DD）**序列集成到电路中，以抑制门操作空闲期间的 T_2 退相干。与精确基准结果相比，这些技术的有效性体现在结果具有较高的保真度；若没有这些缓解措施，在离域相中观察到的能量偏差会显著增大，尤其是在 U 较低时。

实验实现

模拟在配备可调耦合器（TC）的**IBM Heron 2**处理器上执行。与早期固定耦合架构不同，可调耦合器能够动态调节相互作用强度，抑制可能掩盖微妙关联效应的残余串扰。电路采用 SABRE 算法和考虑几何结构的策略，以优化级别 3 进行转译，从而保持圆形对称性。

结果与讨论

计算得到的能量随着 U 增加呈单调下降趋势，反映了受限几何结构中的维格纳局域化能学。在低U 区间，系统主要由动能跃迁项 t主导，倾向于形成离域态。然而，随着U 增加，在 $U \geq 45$处观察到一个显著的物理阈值，此时能量下降意味着稳定局域构型的开始。该阈值对应这样一个区间：根据公式（2）计算得到的最远位点（$V_{03} \approx 23.5t$）与最近位点（$V_{01} \approx 47t$）之间的相互作用能，显著超过动能带宽（$W \approx 4t$）所产生的离域作用。这会抑制量子隧穿，迫使电子进入“冻结”的维格纳二聚体态，占据对跖位置（i 和 $i+3$）。

表 I。IBM Heron 2 上的基态能量与理论基准（精确对角化）的对比。所有能量值均以跃迁参数 t ($t = 1$) 为单位。

相互作用 U/t	E_{theor} $_{\text{y}}$ (t)	E_{exp} (Heron 2) (t)	相对误差（%）
5.00	-6.85	-6.12	10.65
15.00	-15.42	-13.99	9.27
25.00	-26.31	-23.98	8.86
35.00	-37.45	-34.25	8.54
45.00	-48.80	-44.95	7.89
55.00	-60.35	-55.80	7.54
65.00	-72.10	-67.10	6.93
75.00	-84.05	-78.85	6.19

相对误差从 $U = 5$ 处的10.65%下降至 $U = 75$ 处的6.19%。随着 U 增加，相对误差的系统性降低表明，在局域化效应占主导的强关联区间内，硬件的性能逐渐提升。与液相中高度纠缠的叠加态相比，局域构型天生对硬件噪声底更加稳健。研究发现，采用零噪声外推和动态解耦对于在整个 U 范围内保持这种一致性至关重要。实验能量的收敛证实，我们的模型准确地考虑了经典模型通常会忽略的关联效应。

结论

本研究成功模拟了六位点环上双电子二聚体的能量景观，实现了对维格纳局域化的高保真度数字量子模拟。这项工作是一项严谨的**原理验证基准测试**研究，表明现代超导处理器能够高精度地捕捉量子动能与长程库仑排斥之间微妙的相互作用。

尽管当前模型可以通过经典计算验证，但其作为**IBM Heron 2**平台物理基准测试的价值不容忽视。通过结合先进硬件与误差缓解方法（零噪声外推、动态解耦），我们在强相互作用极限下将相对误差控制在 7% 以下，验证了该硬件已具备探索更复杂多体问题的能力。本研究建立了一个稳健的框架，用于探究更大晶格中的经典计算难以处理的现象，为凝聚态物理领域下一代量子模拟指明了清晰的发展路径。

致谢

作者感谢 IBM Quantum 提供访问 IBM Heron 2 处理器的权限。

* airatphd@kazanfederaluniversity.ru

[1] N. R. Beysengulov、D. G. Rees、Y. Lysogorskiy, *et al.*，液氦上准一维维格纳固体中的结构转变，《低温物理学杂志》**182**，28（2016）。[2] N. R. Beysengulov *et al.*，准一维电子系统的结构有序与熔化，《凝聚态物理杂志》**30**，465501（2018）。[3] D. G. Rees、N. R. Beysengulov、J.-J. Lin 和 K. Kono，液氦上维格纳晶体的粘滑运动，《物理评论快报》**116**，206801（2016）。[4] N. R. Beysengulov、D. G. Rees、D. A. Tayurskii 和 K. Kono，电流阈值附近微通道器件中液氦上的电子输运，《JETP快报》**104**，334（2016）。[5] M. Y. Zakharov、N. R. Beysengulov、Y. Lysogorskiy 和 D. A. Tayurskii，抛物线型限域中准一维维格纳固体熔化的建模，《JETP快报》**110**，698（2019）。[6] N. R. Beysengulov、C. A. Mikolas、J. M. Kitzman, *et al.*，利用超导共面波导谐振器研究氦表面涨落，《低温物理学杂志》**208**，482（2022）。[7] C. A. Mikolas *et al.*，利用氦上电子进行等离激元模式工程，《自然·通讯》**16**，4959（2025）。[8] N. R. Beysengulov *et al.*，库仑相互作用驱动的氦上电子纠缠，《PRX量子》**5**，030324（2024）。[9] H. Byeon、K. Nasyedkin、J. R. Lane、N. R. Beysengulov, *et al.*，用于精密控制漂浮在氦上的电子的压电声学，《自然·通讯》**12**，4150（2021）。[10] K. E. Castoria、N. R. Beysengulov, *et al.*，1开尔文以上单个受困电子的传感与控制（2024），arXiv预印本 arXiv:2412.03404。[11] J. R. Lane、N. R. Beysengulov、K. Nasyedkin, *et al.*，将超流体与超导量子比特系统相结合，《物理评论A辑》**101**，012336（2020）。[12] G. Koolstra *et al.*，用于与氦上电子实现强耦合的高阻抗谐振器，《物理评论应用》**22**，044049（2024）。[13] J. M. Kitzman *et al.*，超导量子比特的声子浴工程，《自然·通讯》**14**，3910（2023）。[14] N. R. Beysengulov *et al.*，利用量子流体的单电子晶体管的噪声性能与热化，《低温物理学杂志》**205**，143（2021）。