
中性原子量子存内计算新进展

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41853.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

中性原子量子存内计算新进展。 导读

作为当前国际量子计算竞争中的重要路线之一，中性原子正日益展现其在大规模量子信息处理中的独特优势。上海交通大学金贤敏教授团队围绕这一前沿方向，利用中性原子量子存储器这一核心器件，首次构建出中性原子体系下的量子增强存内随机计算原型。该系统把逻辑运算直接映射为中性原子与光子之间的量子关联过程，通过光子的随机产生与统计累积，在保持高效计算的同时兼顾物理层面的安全性，为面向未来的中性原子存内安全计算架构提供了全新思路。相关成果以Quantum-enhanced Reconfigurable In-memory Stochastic Computing为题发表于光学领域国际权威期刊《Light: Science Applications》。

研究背景

1. 中性原子：从量子信息通用平台走向产业前沿

在全球量子科技版图中，中性原子体系正在成为极具潜力的通用平台之一。与光量子、超导量子、离子阱等路线相比，中性原子具有以下突出的特点：

天然可扩展：利用光学晶格或光镊，可在二维甚至三维中排布数百到上千个原子，国际上诸如Infleqion、QuEra、Pasqal、Atom Computing等公司已演示出数百比特规模的冷原子量子处理器，用于量子模拟与组合优化问题。

长相干时间与高保真操控：冷却并俘获的中性原子，在里德堡态（Rydberg）强相互作用和精确激光控制下，可实现高保真双比特门和可编程的量子比特阵列。

与光的天然接口：中性原子能与光子高效耦合，这不仅是构建量子网络、量子存储的关键，也为全光-原子混合的新型量子计算架构提供了可能。

目前，中性原子量子技术总体上沿两条路线并行发展：

冷原子体系——在超高真空和低温条件下，构建高度可控的量子比特阵列，用于通用量子计算、量子模拟和量子优化。

热原子体系——在更接近室温日常条件的玻璃气室中，实现量子存储、量子光源、随机数产生、量子通信等功能，更易与传统光电系统集成，向实用化、工程化迈进。

上海交通大学金贤敏教授团队长期深耕的，正是以中性原子为核心的量子光－原子混合架构，尤其聚焦存储－计算一体化的新型量子信息处理模式。

2. 冷原子与热原子：在计算与存储中的互补角色

在量子信息技术中，存储和计算是两大基础能力，而中性原子在这两方面都展现出了独特优势。

冷原子：高精度量子计算与量子模拟主力军

利用激光冷却与光学俘获，可将中性原子降至微开尔文甚至纳开尔文量级，形成高度可控的冷原子量子比特。基于里德堡相互作用，研究人员已在二维阵列中实现数十到数百比特的可编程量子模拟器，用于研究自旋模型、量子相变等前沿问题。近年来，多家科研机构和企业已经演示出具有实用潜力的冷原子量子处理器，正积极探索在组合优化、机器学习加速等场景中的应用。冷原子平台更接近通用量子计算机的长期愿景，但其系统复杂度较高、体积较大、运维成本较高。

热原子：量子存储与量子接口的工程化优选

与冷原子相比，热原子气室技术成本更低、体积更小，更易集成，在以下领域快速发展：

量子存储器：利用拉曼散射、集体增强等机制，热原子气室可以将光子的量子信息可逆地写入和读出，实现高效率高保真的量子存储，是未来量子中继器和量子网络的重要器件之一。

量子随机数与量子光源：热原子的自发散射与量子涨落可用来产生高质量随机数和量子关联光子对，已在安全通信、密钥分发中展现应用潜力。

量子增强信号处理：原子气室内的原子数量巨大，在光－原子相互作用中会形成宏观集体相干效应，可用于弱信号低噪音放大、精密测量等场景。

冷原子更偏向高精度、多比特量子运算。热原子则更适合实现量子存储、量子接口和特定任务的量子增强处理。两者在物理机制、实验复杂度以及可实现功能上确实各有明显优势，而且这些优势在很多情况下是互补的。未来，中性原子量子技术的一个重要方向，正是把这两类平台的优势打通，在可扩展计算、可信存储与经典光电系统之间构建高效桥梁。

研究亮点

在这一大背景下，上海交通大学金贤敏教授团队聚焦中性原子系统，近期将量子存储器进一步拓展为可执行计算的存内处理器，在国际上首次演示了量子增强的存内随机计算原型系统。

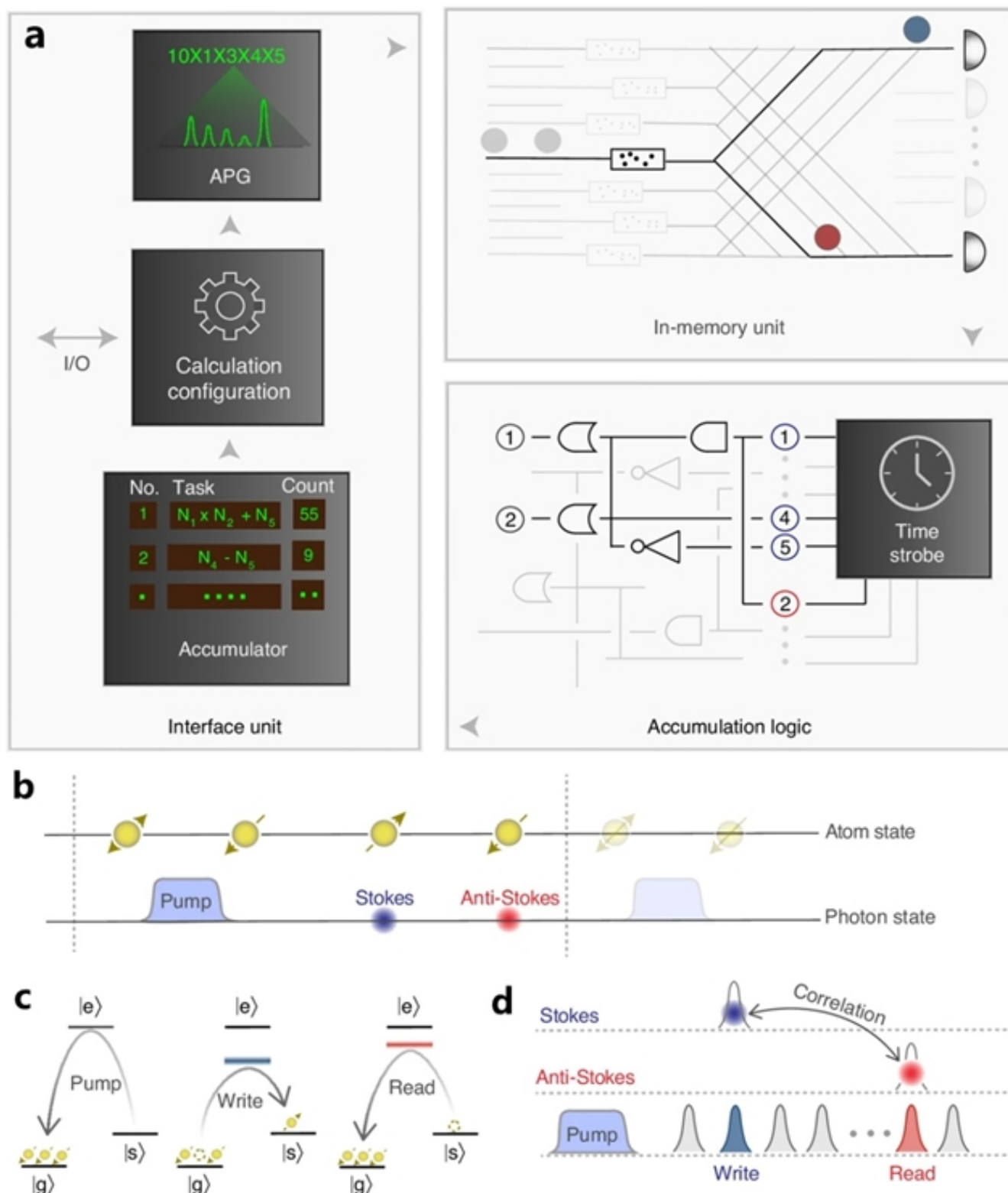


图1：基于铯原子量子存储的存内处理器工作原理。

1. 从存储器到存内处理器：把逻辑运算变成物理过程

传统计算机遵循存储-计算分离架构，数据在存储器和处理器之间频繁搬运，已逐渐成为人工智能和大数据时代的性能瓶颈。存内计算的思路，是直接在存储介质内部完成部分计算，从根本上

减少数据搬运。本研究以中性原子量子存储器为核心器件，将写入－存储－读出的物理闭环直接映射为计算过程（图1）：利用写入光脉冲在原子中建立自旋波，并产生与之量子关联的斯托克斯光子；通过调节写入和读取脉冲的能量、时序和频率，将待计算的数值编码到光子产生概率和原子激发概率中；读取脉冲将自旋波转换为反斯托克斯光子，计算任务则通过关联光子的计数与符合计数来完成。

在这一架构中，加法运算通过在不同时间模式上累积斯托克斯光子计数实现；乘法运算通过测量斯托克斯－反斯托克斯光子对的符合计数实现，依托的是光－原子－光过程中的量子关联。也就是说，这个系统不再仅仅存储光子的量子信息，而是利用量子存储过程本身参与计算，实现了真正意义上的量子存内计算。

2. 利用量子关联，实现低能耗条件下的量子加速

随机计算本身就是依赖大量随机事件统计来完成逻辑运算。传统随机计算要提高速度，往往只能加大脉冲能量来提升事件产生率，这带来更高的能耗与噪声。

本研究的关键在于：即使条件设置到读取效率仅约 0.3% 的情况下，通过精细控制写读光脉冲，系统仍然能够产生明显高于经典噪声背景的非经典光子关联。实验证明：斯托克斯－反斯托克斯光子对的实际符合概率显著高于随机符合概率；在相同脉冲能量条件下，可获得约3倍的有效加速因子（图2a）。这意味着：通过量子关联带来的信息密度提升，在不增加能耗的情况下就能加速运算，是真正由量子机制驱动的性能提升，而非单纯依赖硬件资源堆叠。

3. 统计安全性：随机性自带加密属性

系统的另一个亮点，是在安全计算上的天然优势。由于计算结果来自大量随机光子事件的统计，当只截获到少量事件时，不同输入对应的概率分布高度重叠，窃听者无法区分真实计算结果（图2b）；只有在合法用户积累到足够多的光子计数后，输出分布才会明显分离，重构出正确结果。这一特性等价于在物理层面嵌入了类似统计加密的机制，为远程安全计算和隐私保护提供了新手段。

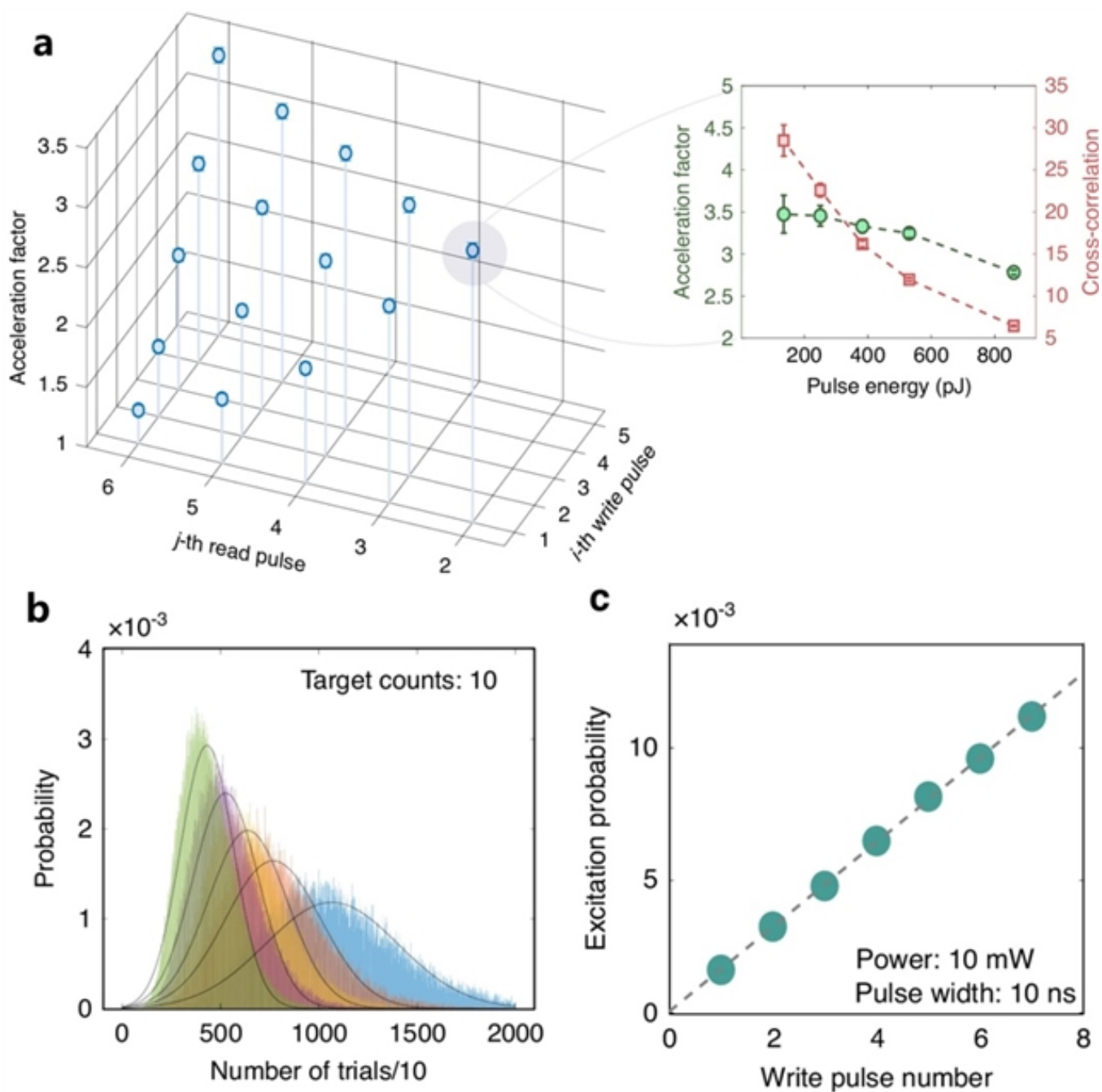


图2：量子存内计算系统的(a)量子关联加速因子、(b)概率分布重叠提供的安全保障，以及(c)多次写入的激发概率。

4. 时间复用实现可重构与并行计算

在架构层面，通过灵活配置写入与读取脉冲的时间序列和时间间隔，这一量子存内计算系统将具有可重构性：同一物理硬件可根据脉冲序列调整执行加法、标量乘法、向量乘法等不同任务；时间复用并行性：将多个计算任务映射到同一脉冲序列上，借助光-原子系统的快速响应，实现并行处理。

这为基于中性原子的大规模、低能耗并行计算提供了实验证据，也展示了量子存储器在未来通用

量子计算系统中的系统级角色：不仅是被动存储器件，而是可编程量子计算单元。

总结与展望

——从原子气室到原子阵列：迈向新一代中性原子量子计算架构

这项工作不仅是中性原子在存储－计算融合领域的首次量子增强演示，更重要的是，它为中性原子量子计算勾勒出一条清晰的技术路线：

1. 架构层面的一致性

当前演示的原子气室系统，本质上是以写入—存储—读出循环来实现可编程计算单元。这一思想可以直接迁移到原子阵列：将每个冷却后的中性原子看作一个可独立寻址的存储－计算节点，通过光场激发和里德堡相互作用在节点间编程耦合，构成可扩展量子处理器。

2. 从单通道到多节点网络

原子气室系统相当于单一存储介质内的单通道处理；中性原子阵列天然提供空间并行寻址与可调耦合，可将这一思路扩展到多节点互联的计算网络，实现更丰富的并行运算和算法结构。

3. 与光子量子信息的无缝接口

本工作建立的光子－原子－光子可逆映射，为未来中性原子量子芯片与光量子通信、光子量子计算模块之间的互联提供了范式：光子负责远距离传输和高速互联；中性原子负责局域存储与高密度计算。

在此之前，金贤敏教授团队还提出并实验构建了光子－原子混合决策框架，利用赝光子阻塞效应实现无冲突决策，为量子加速智能决策提供了核心实验方案ACS Photonics 12, 1300 – 1307 (2025)。在中性原子阵列平台上，这一思路有望与里德堡阻塞效应相结合，为多智能体无冲突决策、分布式控制等复杂任务提供直接的物理实现（图3）。

依托已掌握的中性原子光场调控、量子态存储与读取、高信噪比并行计算等实验技术，团队正以此次工作为起点，持续向以下方向推进：

构建存储－计算一体化的中性原子量子计算新架构；

结合集成光子技术与空间复用技术，实现更小型化、可扩展、易部署的量子存内计算芯片；

在量子安全计算、量子增强机器学习、智能决策等前沿交叉领域拓展应用。（来源：LightScience Applications微信公众号）

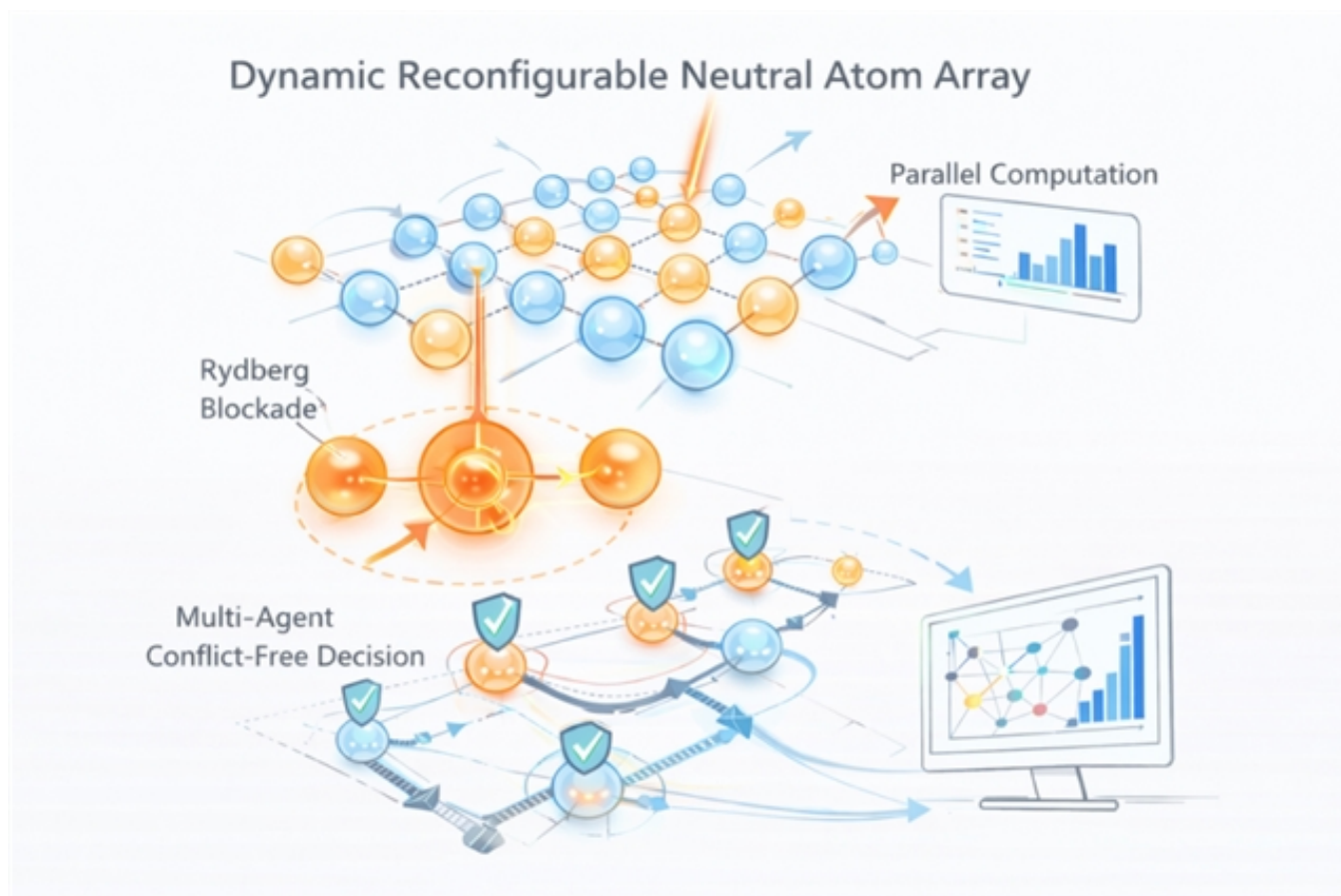


图3：基于中性原子阵列+里德堡阻塞效应的并行安全计算与多智能体无冲突决策。

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-02181-6>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们联系。

作者：金贤敏等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发