

冷原子及其应用

——精密测量与量子模拟

高健硕

北京大学物理学院

2024 年 12 月 17 日



① 课题背景

② 研究现状

③ 参考文献

③ 参考文献

高健硕

- 2022 年，诺贝尔物理学奖颁发给了阿兰·阿斯佩、约翰·克劳泽和安东·蔡林格三位物理学家，以表彰他们为纠缠光子实验、违反贝尔不等式的验证和量子信息科学的开创所做的贡献

高健硕

- 北京大学物理学院

高健硕

- 北京大学物理学院

高健硕
冷原子及其应用

- 从单摆 $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ 可以看出，测量时间的一个底层逻辑就是找到一个周期性系统，并以这个周期性系统的信号周期作为时间的标定

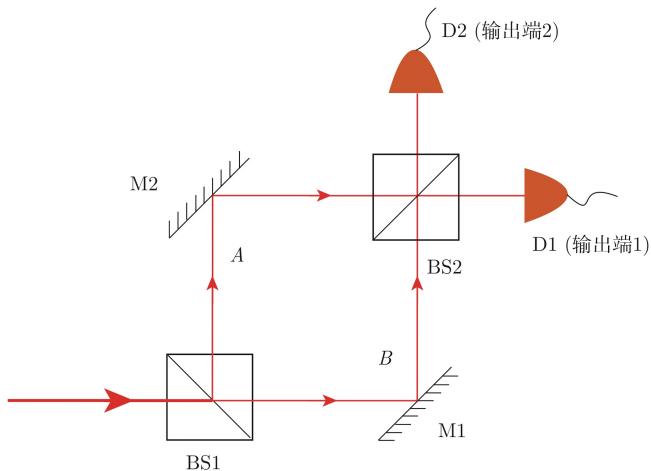
高健硕

- 从单摆 $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ 可以看出，测量时间的一个底层逻辑就是找到一个周期性系统，并以这个周期性系统的信号周期作为时间的标定
- 时间测量的精确度可以表示为 $\delta t = \frac{\delta f}{f}$ ，在测量精确度被限制的情况下，要想有一个更加精确的测量值，我们会倾向于测量一个更高频率的稳定信号

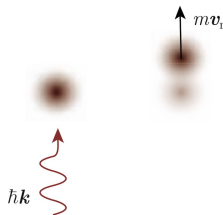
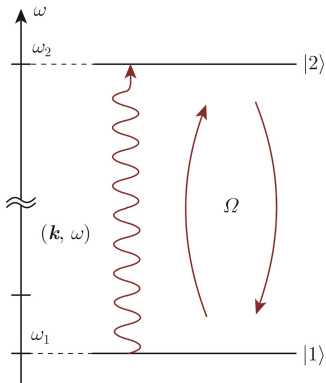
原子钟

- 从单摆 $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ 可以看出，测量时间的一个底层逻辑就是找到一个周期性系统，并以这个周期性系统的信号周期作为时间的标定
- 时间测量的精确度可以表示为 $\delta t = \frac{\delta f}{f}$ ，在测量精确度被限制的情况下，要想有一个更加精确的测量值，我们会倾向于测量一个更高频率的稳定信号
- 石英晶体的频率在 100MHz 量级，而原子的共振频率在 100THz 量级，是石英晶体的 10^6 倍，所以通过原子与激光的相互作用，以测量的原子共振频率为标准来精确测量时间的原子钟就成为精确度远超石英钟的测量手段

高健硕
冷原子及其应用



原子干涉仪





原子干涉仪

- 在原子干涉仪中，不仅要计算原子和光相互作用而获得的相位 ϕ_{laser} ，还要计算由原子运动所获得的相位 $\phi_{propagation}$ ，

即 $\phi_i = \phi_{laser} + \phi_{propagation}$ 其中

$$\phi_{laser} = \sum_i \pm [kr(t_i) - \omega t_i + \phi_i]$$

原子干涉仪

- 第二项通过费曼路径积分计算 $\phi_{\Gamma} = \frac{1}{\hbar} \int_{t_i}^{t_f} [\frac{mv^2}{2} - V(r)] dt$

原子干涉仪

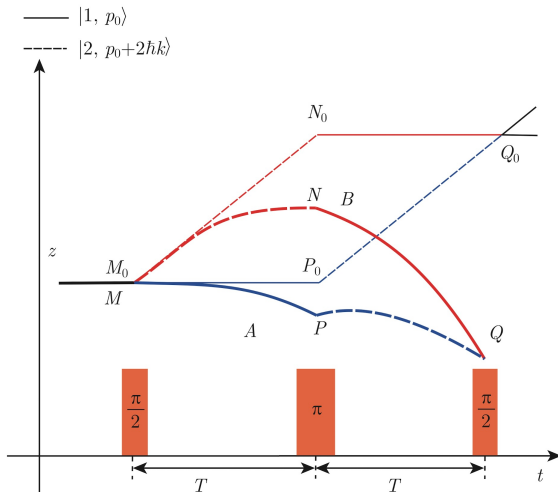
- 第二项通过费曼路径积分计算 $\phi_{\Gamma} = \frac{1}{\hbar} \int_{t_i}^{t_f} [\frac{mv^2}{2} - V(r)] dt$
- 考虑最简单的情形, $V = -ma \cdot r$

原子干涉仪

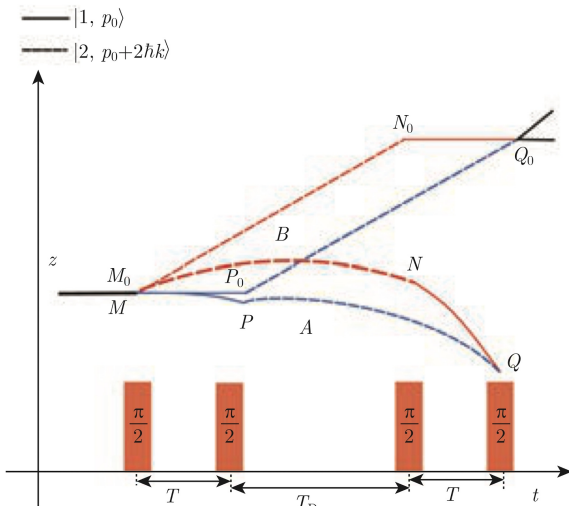
- 第二项通过费曼路径积分计算 $\phi_{\Gamma} = \frac{1}{\hbar} \int_{t_i}^{t_f} [\frac{mv^2}{2} - V(r)] dt$
- 考虑最简单的情形, $V = -ma \cdot r$

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{\text{propagation}} &= \frac{m}{\hbar} (\mathbf{v}_B \cdot \mathbf{r}_B - \mathbf{v}_A \cdot \mathbf{r}_A)_{t_i}^{t_f} - \frac{m}{\hbar} \int_{t_i}^{t_f} \frac{\mathbf{v}_B^2 - \mathbf{v}_A^2}{2} dt \\ &= \Delta\phi_{\text{separation}} + \Delta\phi_{\text{kinetic}}. \end{aligned}$$

原子干涉仪



原子干涉仪



原子干涉仪的意义

- 检测标准模型

原子干涉仪的意义

- 检测标准模型
- 探测引力波

波色—爱因斯坦凝聚态 (BEC)

- 1924 年，爱因斯坦在波色的文章中读到了一些光子统计的新想法

波色—爱因斯坦凝聚态 (BEC)

- 1924 年，爱因斯坦在波色的文章中读到了一些光子统计的新想法
- 如果持续将玻色子的温度降到足够低的程度，系统中的粒子将大量占据系统的基态，从而形成一种新的物态，即波色—爱因斯坦凝聚态 (Bose—Einstein condensation)

波色—爱因斯坦凝聚态 (BEC)

- 1924 年，爱因斯坦在波色的文章中读到了一些光子统计的新想法
- 如果持续将玻色子的温度降到足够低的程度，系统中的粒子将大量占据系统的基态，从而形成一种新的物态，即波色—爱因斯坦凝聚态 (Bose—Einstein condensation)
- 这一物态被称为除气体、液体、固体、等离子体之外的第五态

BEC 的制备

- 为了得到稀薄气体的 BEC，首先一个问题就是如何原子给冷下来，而光子与原子间的相互作用是这一过程的关键

BEC 的制备

- 为了得到稀薄气体的 BEC，首先一个问题就是如何原子给冷下来，而光子与原子间的相互作用是这一过程的关键
- 20 世纪 60 年代激光的出现打开了人们研究光子与分子相互作用的大门

BEC 的制备

- 为了得到稀薄气体的 BEC，首先一个问题就是如何原子给冷下来，而光子与原子间的相互作用是这一过程的关键
- 20 世纪 60 年代激光的出现打开了人们研究光子与分子相互作用的大门
- 因为在激光和磁阱对冷却原子以及囚禁原子上做出的贡献，朱棣文等人获得了 1997 年的诺贝尔物理学奖

光晶格中的波色气体

- 在冷原子研究中，一个非常热点的研究方向就是把超冷原子置于光晶格（optical lattice）中，从而模仿固体物理中的周期性势能。固体晶格中运动的物体是电子，它可以对应光晶格系统中的冷原子。而固体原子核提供的周期性势场，可以等效于激光提供的光晶格外势场

光晶格中的波色气体

- 在冷原子研究中，一个非常热点的研究方向就是把超冷原子置于光晶格（optical lattice）中，从而模仿固体物理中的周期性势能。固体晶格中运动的物体是电子，它可以对应光晶格系统中的冷原子。而固体原子核提供的周期性势场，可以等效于激光提供的光晶格外势场
- 光晶格的间距为激光波长的二分之一，大约在 100nm 量级，远大于固体晶格 100pm 量级的周期

光晶格中的波色气体

- 在冷原子研究中，一个非常热点的研究方向就是把超冷原子置于光晶格（optical lattice）中，从而模仿固体物理中的周期性势能。固体晶格中运动的物体是电子，它可以对应光晶格系统中的冷原子。而固体原子核提供的周期性势场，可以等效于激光提供的光晶格外势场
- 光晶格的间距为激光波长的二分之一，大约在 100nm 量级，远大于固体晶格 100pm 量级的周期
- 原子的质量是电子的 10^5 倍左右，这使得在光晶格中研究超冷原子的行为，并用其来解释固体物理中熟知但不可解的模型成为可能

光晶格与量子模拟

- 光晶格由对射的激光相干涉而形成，由于光诱导原子的偶极矩，它与光场的相互作用导致势能形成一个与光场强度成正比的偏移（即 AC—Stark 偏移）

光晶格与量子模拟

- 光晶格由对射的激光相干涉而形成，由于光诱导原子的偶极矩，它与光场的相互作用导致势能形成一个与光场强度成正比的偏移（即 AC—Stark 偏移）
- 因此，光的干涉引起的周期性光强则对原子产生一个周期性的势能，即周期性的光晶格势

利用冷原子进行量子模拟的优势

- 哈密顿量易调控：冷原子系统的哈密顿量参数，可以在实验中通过改变光晶格的深度（即调整激光的强度）容易地进行调节

利用冷原子进行量子模拟的优势

- 哈密顿量易调控：冷原子系统的哈密顿量参数，可以在实验中通过改变光晶格的深度（即调整激光的强度）容易地进行调节
- 系统信息易观测：冷原子实验系统中最常见的一个探测手段就是飞行时间探测（TOF, time-of-flight），即突然将束缚原子的势阱全部关掉，让原子自由扩散一段时间，通过在起始和终止时刻进行拍照，来判断原子的位移。如果我们假设扩散时间足够长，即原子团的初始尺寸相比扩散后的半径可以忽略不计，那么我们可以直接根据扩散时间来推算系统的动量分布

基本理论

- 在考虑不同种类的原子可能同时存在的情况下,

$$\hat{H} = \sum_{\sigma} \int d^d r \hat{\Psi}_{\sigma}^{\dagger}(r) \left[-\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m_{\sigma}} + V_{\sigma}(r) \right] \hat{\Psi}_{\sigma}(r) +$$

$$\frac{1}{2} \sum_{\sigma, \sigma'} \int d^d r \int d^d r' \hat{\Psi}_{\sigma}^{\dagger}(r) \hat{\Psi}_{\sigma'}^{\dagger}(r') U_{\sigma, \sigma'}(r' - r) \hat{\Psi}_{\sigma'}(r') \hat{\Psi}_{\sigma}(r)$$

基本理论

- $\hat{K} = \hat{H} - \mu \int dr \hat{\Psi}_\sigma^\dagger(r) \hat{\Psi}_\sigma(r)$

基本理论

- $\hat{K} = \hat{H} - \mu \int d\mathbf{r} \hat{\Psi}_{\sigma}^{\dagger}(\mathbf{r}) \hat{\Psi}_{\sigma}(\mathbf{r})$

-

$$\begin{aligned} \hat{K} = & \int d^d \mathbf{r} \hat{\Psi}^{\dagger}(\mathbf{r}) \left[\frac{-\hbar^2 \nabla^2}{2m} + V(\mathbf{r}) - \mu \right] \hat{\Psi}(\mathbf{r}) \\ & + \frac{1}{2} \int d^d \mathbf{r} \int d^d \mathbf{r}' \hat{\Psi}^{\dagger}(\mathbf{r}) \hat{\Psi}^{\dagger}(\mathbf{r}') U_{\text{int}}(\mathbf{r}' - \mathbf{r}) \hat{\Psi}(\mathbf{r}') \hat{\Psi}(\mathbf{r}) \end{aligned}$$

冷原子与量子信息——以里德堡原子为例

- 取间距为 R 的两个里德堡原子，假设它们的单原子态是一个二能级系统，包含一个基态 $|g\rangle$ 和一个里德堡态 $|r\rangle$ ，其能量差为 E_n ，拉比振荡频率为 Ω

冷原子与量子信息——以里德堡原子为例

- 取间距为 R 的两个里德堡原子，假设它们的单原子态是一个二能级系统，包含一个基态 $|g\rangle$ 和一个里德堡态 $|r\rangle$ ，其能量差为 E_n ，拉比振荡频率为 Ω
- 当我们考虑双能级系统时，原则上可以产生 $|gg\rangle$ 、 $|gr\rangle$ 、 $|rg\rangle$ 、 $|rr\rangle$ 四种情况，但由于阻塞效应的存在，当它们的距离近到范德瓦耳斯力作用显著的范围之内后， $|rr\rangle$ 能级将发生一个显著的偏移 $\Delta E(R)$

冷原子与量子信息——以里德堡原子为例

- 取间距为 R 的两个里德堡原子，假设它们的单原子态是一个二能级系统，包含一个基态 $|g\rangle$ 和一个里德堡态 $|r\rangle$ ，其能量差为 E_n ，拉比振荡频率为 Ω
- 当我们考虑双能级系统时，原则上可以产生 $|gg\rangle$ 、 $|gr\rangle$ 、 $|rg\rangle$ 、 $|rr\rangle$ 四种情况，但由于阻塞效应的存在，当它们的距离近到范德瓦耳斯力作用显著的范围之内后， $|rr\rangle$ 能级将发生一个显著的偏移 $\Delta E(R)$
- 当 $\Delta E(R) \sim C_6/R^6 \gg \hbar\Omega$ 时，激光与 $|rr\rangle$ 态不再共振，这也使得两个原子不能同时被激发到里德堡态上

冷原子与量子信息——以里德堡原子为例

- 这一效应使得系统可以处于只有一个原子被激发的叠加态，
即 $|\Psi_+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|gr\rangle + e^{i\phi}|rg\rangle)$

冷原子与量子信息——以里德堡原子为例

- 这一效应使得系统可以处于只有一个原子被激发的叠加态，
即 $|\Psi_+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|gr\rangle + e^{i\phi}|rg\rangle)$
- 基于这个对称态计算与双原子基态的耦合项，即
 $-\langle\Psi_+|\hat{\mathbf{d}}_A\mathbf{E}_Le^{ik\cdot\mathbf{R}_A} + \hat{\mathbf{d}}_B\mathbf{E}_Le^{ik\cdot\mathbf{R}_B}|gg\rangle = \sqrt{2}\hbar\Omega$

冷原子与量子信息——以里德堡原子为例

- 这一效应使得系统可以处于只有一个原子被激发的叠加态，即 $|\Psi_+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|gr\rangle + e^{i\phi}|rg\rangle)$
- 基于这个对称态计算与双原子基态的耦合项，即 $-\langle\Psi_+|\hat{\mathbf{d}}_A\mathbf{E}_L e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{R}_A} + \hat{\mathbf{d}}_B\mathbf{E}_L e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{R}_B}|gg\rangle = \sqrt{2}\hbar\Omega$
- 这个式子告诉我们，里德堡阻塞效应下的双原子系统，其基态与激发态的耦合频率变成了 $\sqrt{2}\Omega$ 。将上述结论扩展到 N 个原子的系统，则

$$|W\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum (|rggg\cdots g\rangle + |grgg\cdots g\rangle + \cdots + |gggggr\rangle)$$

冷原子与量子信息——以里德堡原子为例

- 设计量子计算机的第一步，就是要找到量子系统中的比特，即量子比特，并通过量子系统的特性，设计量子比特的逻辑门

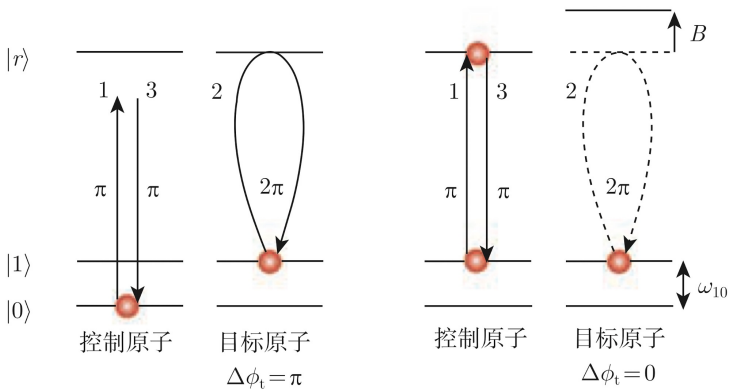
冷原子与量子信息——以里德堡原子为例

- 设计量子计算机的第一步，就是要找到量子系统中的比特，即量子比特，并通过量子系统的特性，设计量子比特的逻辑门
- 对于一个二能级的量子系统，可以用两个能级的量子态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 来代表二进制中的 0 和 1，如电子的自旋，光子的极化等

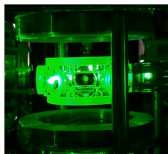
冷原子与量子信息——以里德堡原子为例

- 设计量子计算机的第一步，就是要找到量子系统中的比特，即量子比特，并通过量子系统的特性，设计量子比特的逻辑门
- 对于一个二能级的量子系统，可以用两个能级的量子态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 来代表二进制中的 0 和 1，如电子的自旋，光子的极化等
- 与经典比特不同，量子比特除了处在绝对的 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 态外，还可以处于 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的量子叠加态

冷原子与量子信息——以里德堡原子为例



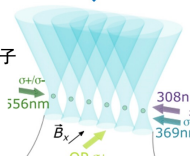
磁光阱
冷原子团



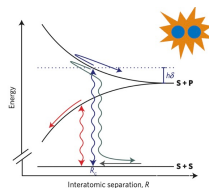
光镊束缚多个原子

光偶极力

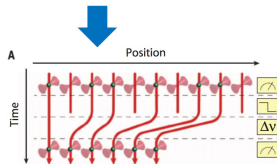
$$U(\vec{r}) \propto -I(\vec{r})$$



J. Wilson PhD Thesis
Ma et al. PRX (2022)



光化学反应
光镊中装载0或1个原子



重排
无缺陷单原子阵列

Grünzweig et al. Nat Phys (2010)

Kim et al. Nat. Comm. (2016)
Barredo et al. Nature (2016)
Endres et al. Science (2016)

量子计算机需要满足的标准

- 量子计算机需要满足 Divincenzo 标准

量子计算机需要满足的标准

- 量子计算机需要满足 Divincenzo 标准
- 1. 表征量子比特：物理系统可以承载量子比特，且具有可扩展性。

量子计算机需要满足的标准

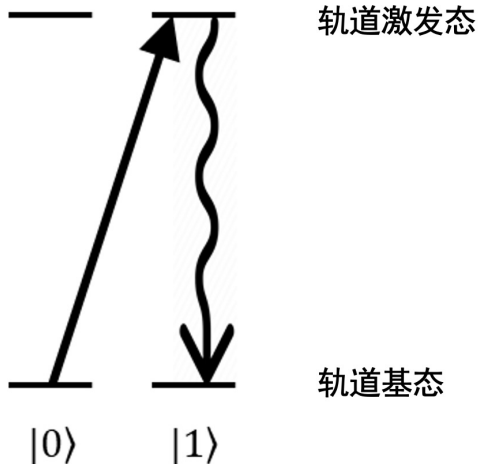
- 量子计算机需要满足 Divincenzo 标准
- 1. 表征量子比特：物理系统可以承载量子比特，且具有可扩展性。
- 最简单的方式就是使用二能级系统，电子自旋或者光子极化

量子计算机需要满足的标准

- 2. 能够将量子比特初始化到简单的量子初态

量子计算机需要满足的标准

- 2. 能够将量子比特初始化到简单的量子初态

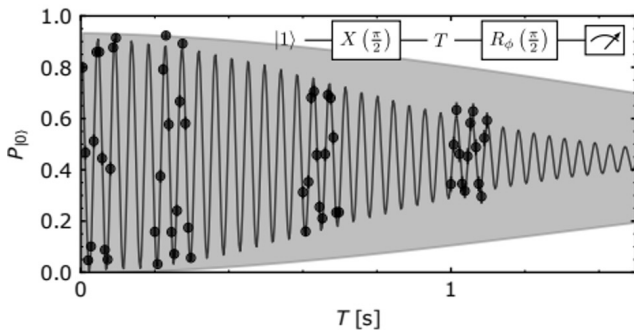


量子计算机需要满足的标准

- 3. 退相干时间比门操作时间长

量子计算机需要满足的标准

- 3. 退相干时间比门操作时间长



核自旋能级相干时间 $> 1s$

量子计算机需要满足的标准

- 4. 有一套通用的量子门操作

量子计算机需要满足的标准

- 4. 有一套通用的量子门操作
- 理论上证明，任意一个单量子门加上一个纠缠的双量子门操作就可以实现所有门操作

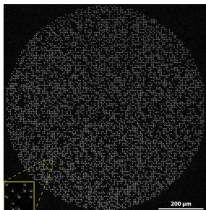
量子计算机需要满足的标准

- 5. 具有特定量子比特的测量能力

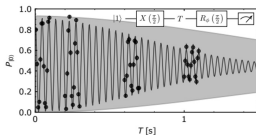
量子计算机需要满足的标准

- 5. 具有特定量子比特的测量能力
- 投影测量是提取结果的主要方式，除此之外也有平均测量方法，但是会导致输出结果存在概率性问题

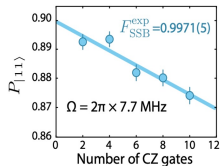
中性原子阵列的现状



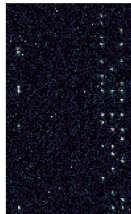
规模 **6100 atoms**
可重排



长相干时间 > 1 s

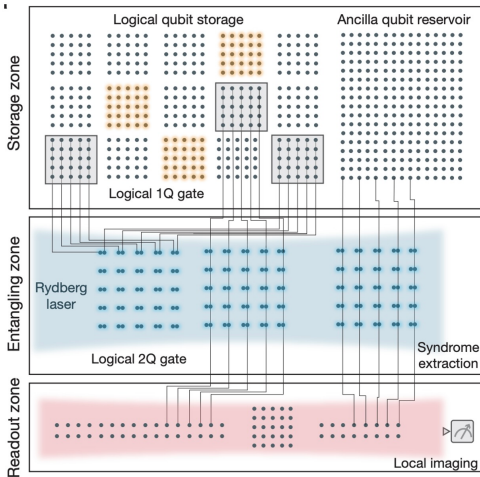


双比特门时间 **0.1 us**
双比特门保真度 = **99.7%**



大规模并行读出

中性原子阵列计算机的运行原理



① 课题背景

② 研究现状

③ 参考文献

- 12月10日凌晨，谷歌公布重大突破——其最新量子芯片 Willow 在基准测试中取得惊人成绩，不到五分钟完成一项标准计算，而如今最快的的超级计算机完成同样任务，需要花费 10^{25} 年时间

- 12月10日凌晨，谷歌公布重大突破——其最新量子芯片 Willow 在基准测试中取得惊人成绩，不到五分钟完成一项标准计算，而如今最快的超级计算机完成同样任务，需要花费 10^{25} 年时间
- Willow 的突破可在使用更多量子比特的情况下成倍减少错误，破解了近三十年来一直在研究的量子纠错挑战

最新快报

- 12 月 10 日凌晨，谷歌公布重大突破——其最新量子芯片 Willow 在基准测试中取得惊人成绩，不到五分钟完成一项标准计算，而如今最快的超级计算机完成同样任务，需要花费 10^{25} 年时间
- Willow 的突破可在使用更多量子比特的情况下成倍减少错误，破解了近三十年来一直在研究的量子纠错挑战
- Willow 实现了错误率的指数级降低，这意历史性成就在业界被称为『低于临界值 (below threshold)』——能在增加量子比特数量的同时减少错误

③ 参考文献

- 《冷原子物理与低维量子气体》，姚和朋，郭彦良等著
- Quantum simulation and computing with Rydberg interacting qubits, AVS Quantum Sci. 3, 023501(2021)
- Parallel Implementation of High-Fidelity Multiqubit Gates with Neutral Atoms, Physical Review Letters 123, 170503(2019)
- A quantum processor based on coherent transport of entangled atom arrays, Nature Vol 604 21 April 2022
- Atom by atom assembly of defect-free one-dimensional cold atom arrays, Research Report
- Ultracold Atomic Physics, Hui Zhai
- Quantum error correction below the surface code threshold, Nature

Thanks!