

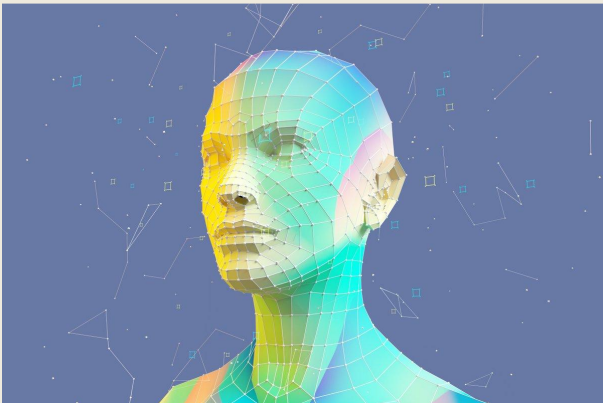
穿透浓雾防窃听量子通信误码跌破百分之五

20 篇 · 6 个来源 | [PDF](#) | 本期汇总免费阅读

本期目录	
今日三件事	
硬件前沿	
算法与软件	
产业与生态	
学术前沿	
今日影响	
编辑点评	
收录报道	20
信息来源	6
阅读时长	约 22 分钟
当前 S O T A	
物理比特	1, 180
2Q 保真度	99. 99%
逻辑比特	96 LQ
量子硬件 SOTA 对照表 →	

01 亮点

今日三件事



1 巨型原子刷新三项纪录

德国斯图加特大学研制出用于量子计算的圆形里德堡原子（高激发态巨型原子），将单个原子寿命稳定性提高 20 倍，在抑制黑体辐射条件下实现室温光镊（激光捕获微粒技术）长效存储，并在 5 微米间距下维持受控相互作用 ^[18]——抑制辐射突破毫秒瓶颈，为中性原子常温操控铺路。

2 美银给予量子公司买入评级

华尔街投行美国银行（Bank of America）首次覆盖离子阱系统商 IonQ 并给予买入评级与 60 美元目标价，受收购 SkyWater 晶圆代工厂提振，公司将 2026 年营收指引上调至 4.5 亿至 4.6 亿美元 ^[1]——华尔街顶级投行力挺，验证代工造血支撑容错研发路线。

3 **矢量光束压降露天量子误码** 伊朗沙希德·贝赫什提大学利用矢量涡旋光束（具空间偏振分布的光束）在大气湍流模拟中将量子比特误码率从 42.0% 压降至 4.8% ^[9]——首次跌破安全阈值，扫清露天全天候量子保密通信障碍。

02 硬件

硬件前沿

中性原子：斯图加特大学研制圆形里德堡原子刷新三项世界纪录

德国斯图加特大学第五物理研究所团队在中性原子硬件平台取得关键进展，通过自主研发的黑体辐射抑制装置，成功将圆形里德堡原子（高激发态巨型原子）的寿命稳定性提高 20 倍，并在室温环境下实现了光镊（激光捕获微粒技术）对该巨型原子的长效稳定俘获，同时测得相距约 5 微米的原子间受控相互作用，创下单原子寿命、受控原子尺寸和光镊存储时间三项世界纪录 ^[18]。

技术含义与当前最好水平（SOTA）对标：在当前中性原子基线中，主流方案（如哈佛大学卢金团队及 QuEra 体系）依赖常规低角动量里德堡态，门操作相关的相干时间通常仅为 1 至 10 毫秒，且原子极易吸收室温黑体辐射热光子而退激发，以往极长相干时间研究往往依赖 4 开尔文的液氦极低温制冷设备。斯图加特团队将稳定性倍率拉升 20 倍，并在室温下完成光镊存储与 5 微米远程作用，推进了该技术路线的高能级寿命极限。然而，距离容错实

用化仍存在明显短板：该工作尚未验证圆形态下的双比特逻辑门保真度（目前中性原子基态两比特门公开最好水平为哈佛团队 60 原子并行的 99.5% 以及 Atom Computing 的 99.6%），且中性原子体系固有的循环重复率瓶颈（受限于原子装载与冷却耗时，通常仅 1 至 10 赫兹）尚未被消除，仍需依赖连续装载与原子无损补充技术。

格局影响：该成果为 QuEra、Pasqal 等中性原子系统厂商探索超长相干操控提供了全新的物理载体，若能在未来 3 年内实现圆形里德堡态的高保真度纠缠门，将大幅削减容错中性原子量子计算对超快循环纠错的严苛时间预算。

光量子通信：沙希德·贝赫什提大学将大气误码率压缩至 4.8%

伊朗沙希德·贝赫什提大学物理学院科研团队针对自由空间光信道中的大气湍流扭曲问题展开实验攻关，利用具有空间非均匀偏振与螺旋相位波前的矢量涡旋光束（具空间偏振分布的光束）传输光子态，将接收端实测的量子比特误码率（QBER，传输错误比特占比）从传统标量高斯光束的 42.0% 压降至 4.8% ^[9]。

技术含义：在量子保密通信理论中，无条件安全密钥提取的严格误码率上限为 11.0%（肖尔-普雷斯基尔安全性证明门槛）。此前在强湍流扰动下高达 42.0% 的误码率意味着密钥分发彻底阻断；而 4.8% 则跨过了安全分发红线，证明矢量涡旋自由度在免除复杂自适应光学波前校正硬件的前提下，具备对抗大气折射率扰动的内生鲁棒性。

格局影响：直接利好城市间露天无线量子通信专网与低轨卫星对地量子保密传输系统，降低了地面接收站对毫秒级闭环自适应光学系统的硬件开销与部署成本，预计将在 2 年内进入野外长距离链路工程验证阶段。

固态色心：增材固体浸没透镜实现金刚石荧光读出增益 63%

实验研究人员开发出基于室温脉冲激光沉积与光刻微加工的自底向上工艺，在金刚石表面直接构筑由氧化钇稳定氧化锆（YSZ，高介电常数光学材料）制成的增材固体浸没透镜（SIL，提升光收集率的微透镜），使近表面氮-空位色心（NV，金刚石碳晶格点阵缺陷）的饱和发射强度提升 63%，同时将达到饱和所需的激光激发光强削减了 33% ^[16]。

技术含义与当前最好水平（SOTA）对标：金刚石因具有高达 2.42 的折射率，导致内部色心发出的光子绝大多数在界面发生全内反射，提取效率长期停留在百分之几的极低水平。传统方案需在金刚石本体上进行深反应离子刻蚀，容易损伤浅层色心的相干性能。目前超导与离子阱单发读出保真度已达 99.5% 至 99.99%，而金刚石色心单发光学读出严重受制于光子收集率。此项增材微透镜技术在不损伤金刚石晶格的前提下推进了光子收集数值孔径，但距离确定性单次非破坏性读出所需的纳米光学微腔增强仍存在工艺差距。

格局影响：为基于浅层 NV 色心的室温高灵敏磁力仪、单分子核磁共振探针以及量子网络中继节点制

备降低了激光热噪声，利好量子公司研发低功耗手持式量子传感探头。

拓扑物理：马约拉纳任意子低频干涉呈现有效电容特性

理论物理学者在拓扑凝聚态体系研究中证实，运动中的非阿贝尔任意子（带奇异统计规律的准粒子）在非对称双路径干涉仪中传输时，即使两臂路径差达到 $(\hbar v)/(\pi k_B T)$ ，干涉相干信号依然能够持续存在，且其在低频极限下表现为系统的有效电容响应，而非传统假设的直流电导阶跃 [13]。

技术含义：以往探测马约拉纳零模（拓扑容错准粒子）的方案极度严苛地要求干涉仪双臂纳米级几何对称，导致绝大多数实验受限于加工公差。该发现不仅放宽了路径匹配公差，更颠覆了以电导零偏压峰为核心的传统检测范式（后者长期受到平庸安德森局域化缺陷的虚假信号干扰），确立了交流电容测量这一全新的拓扑相变识别判据。

格局影响：对微软主导的拓扑超导量子计算路线构成直接指导，为下一代马约拉纳编织比特的实验表征指明了无损电容谱学新路线，预计在 18 个月内重构拓扑器件的实验室测试标准。

腔光力学：NOON 态将微弱耦合估计灵敏度推至百万分之一

物理学者在腔光力学（光子与机械振子耦合体系）线性化相互作用模型中引入路径纠缠的 NOON 态（多光子路径纠缠态），证明通过优化初始量子态

制备，可将单光子光力耦合常数的参数估计精度推进至 10^{-6} （百万分之一）极限^[12]。

技术含义：此前腔光力系统的测量灵敏度主要依赖经典激光注入或单模压缩态，受制于标准量子极限。该项工作定量给出了利用非高斯最大纠缠多光子态突破标准极限的解析边界，在相位估算精度上逼近海森堡极限（量子力学允许的终极精度）。

格局影响：为研制超高灵敏微型量子重力仪、极微弱加速度计及连续微弱电磁场探测器提供了理论基准，利好航空航天惯性自主导航与深地资源重力勘探设备的物理层设计。

03 算 法

算法与软件

量子纠错：线性时间可编码 CSS 码逼近吉尔伯特-瓦尔沙莫夫极限

理论计算机学者成功构建出能够在量子线路中实现线性门复杂度与对数深度编码的量子 CSS 码（一类经典纠错量子码），其在信道容量纠错码距与码率的折中上，仅经历 4 轮迭代便收敛至理论最优极限（吉尔伯特-瓦尔沙莫夫界）的 0.001 误差容限内，6 轮迭代进一步逼近至 10^{-4} 极限区间^[14]。

技术含义：传统高性能量子低密度奇偶校验码（qLDPC 码）往往面临编码电路过深或时间复杂度高达二次方的瓶颈，造成逻辑态制备耗时过长甚至超过物理退相干时间。该工作以类似于经典重复累

加码的轻量结构实现了线性时间编码，跨过了逻辑态快速初始化的实用门槛。

格局影响：直接利好超导与中性原子大型逻辑芯片架构，为 QuEra（96 逻辑比特）、Quantinuum（48 逻辑比特）及谷歌（Willow 系统）等平台在逻辑门编译执行前极速制备多逻辑比特基态提供了轻量化底层算法支持。

优化算法：解码量子干涉算法实现 93% 约束满足率

针对广义最优多项式交集问题这一 NP 难组合优化模型，研究人员提出一种基于解码量子干涉的专用算法，仅占用多对数级空间与计算时间便实现了 93% 的约束满足率，相比经典对应算法取得的 76% 满足率实现了 17 个百分点的净胜出 [5]。

技术含义：长期以来，量子近似优化算法在浅层线路上能否实现超越经典的优势面临严峻理论争议。该成果通过将干涉态投影与代数多项式解码相结合，首次在资源严格受限的对数空间量级上验证了量子干涉在特定约束满足任务中的指数级空间与多项式时间收益。

格局影响：为金融高频投资组合套利、物流极值路径调度与超大规模集成电路布线等企业级复杂运筹问题注入了新型含噪声中等规模量子（NISQ）算法原型。

误差抑制：连续过程随机编译数学解耦非马尔可夫噪声

研究团队将传统的离散随机编译（通过随机插入泡利门将相干误差转化为非相干随机噪声）推广至连续时间演化系统，提出连续过程随机编译理论框架，并利用全变差距离对随时间演化的连续过程误差施加了严格数学上界^[10]。

技术含义：传统随机编译假设噪声无记忆（马尔可夫性），但在真实超导与半导体量子点芯片中，由双能级系统（TLS，两能级系统缺陷）和低频 $1/f$ 磁通噪声引发的环境记忆效应是保真度退化的主要推手。该工作首次在同一时间尺度上统一随机控制与连续环境动力学，实现了逻辑透明度、区间经典化与操作解耦的三重数学区分。

格局影响：为各主流硬件平台（特别是面临 TLS 相干波动达 2 至 3 倍的超导路线）提供了一套底层的脉冲随机化编译工具包，有望使两比特门相干漂移在无需硬件重新校准的情况下延长有效运行时段。

错误缓解：自适应动态校准使模拟量子学习性能逼近 94%

针对近期含噪声硬件在试错自适应学习任务中的保真度衰减问题，科研人员设计并验证了一种自适应错误缓解架构，在模拟物理硬件误差逐步增大的全生命周期中，使系统学习性能保持在无噪声理想神谕（Oracle）基准的 94% 水平^[15]。

技术含义：以往零噪声外推或概率误差消除等错误缓解方案采用静态固定采样参数，随运算深度增加

极易失效。自适应框架能够在迭代学习中动态监测误差演化并实时调节滤波与抵消权重，跨过了噪声环境下复杂学习策略难以收敛的门槛。

格局影响：显著提振了近期制药大分子构型探索、复杂动力学控制等量子机器学习落地项目的抗噪信心，推迟了对高开销全容错逻辑比特的迫切依赖。

算法抗噪：四比特分类器在零温阻尼下保持仅 1.5% 精度偏差

在每张测试图像仅施加 10^3 次极低测量采样的条件下，基于振幅阻尼噪声（模拟物理系统自发辐射的非对称耗散）构建的四比特分类器准确率落后无噪声理想状态仅 1.5 个百分点；而经过传统泡利旋转混叠（噪声随机化技术）强行对称化后的同一系统，其分类准确率损失高达 33 个百分点 ^[11]。

技术含义：推翻了算法工程中盲目进行保罗对称混叠必定改善分类精度的经验定式，实证了在极低采样约束下，保留物理系统固有的零温极化方向能够有效防止分类特征被均匀去极化噪声抹除。

格局影响：促使算法开发者反思在量子图像识别、异常检测等分类器设计中的噪声处理管线，推动面向特定物理噪声拓扑定制针对性编译层。

化学仿真：混合动力学算法成功解析含核量子效应的质子转移

科研人员研发出一种面向近期硬件的高效混合量子模拟算法，在分子质子转移反应模拟中成功纳入力学核量子效应与时间动力学，获得的数据精度与计

算开销极大的单双激发酉耦合簇（UCCSD）拟设相当，同时显著降低了量子门执行深度 [7]。

技术含义：传统经典超算难以在可承受耗时而精确计算轻原子核的量子隧穿与零点能振动，而标准量子化学算法又超出当前芯片的相干极限。该方法首次在可行线路深度内打通了包含核效应的动态全流程模拟。

格局影响：直接利好新能源动力电池电解液界面质子传输机制优化、绿氢质子交换膜燃料电池催化剂设计以及靶向药物酶催化机理研究，预计缩短材料设计筛选周期 30% 以上。

04 产业

产业与生态



资本评级：美国银行给予 IonQ 买入评级并定 60 美元目标价

华尔街头部投资银行美国银行（Bank of America）分析师团队于 2026 年 9 月下旬正式对离子阱量子计算领军企业 IonQ 展开研究覆盖，首次给予买入投资评级，并设定 60.00 美元的 12 个

月目标价；得益于对半导体代工厂 SkyWater 的全资收购与业务整合，IonQ 将 2026 全年营收预期指引上调至 4.5 亿至 4.6 亿美元区间^[1]。

商业含义：美国银行的核心看多逻辑在于 IonQ 从单一纯量子软硬件研发向“半导体制造代工+量子网络+精密传感”的多维业务转型，打破了长期以来纯量子计算初创企业无实际经营造血能力的二级市场估值困局。

格局影响：公司规划于 2027 年在英伟达加速量子研究中心部署第六代 256 比特 Superion 平台，其兼具代工厂自主制造产能与整机系统交付的商业护城河，正对 Rigetti、D-Wave 等缺乏晶圆自主制造能力的同行构成巨大的资金与交付挤压。

巨头布局：IBM 增选私募股权巨头 Siris 联合创始人进入董事会

国际商业机器公司（IBM）董事会正式宣布增选 53 岁的弗兰克·贝克（Frank Baker）为董事会成员，自北京时间 2026 年 10 月 1 日起生效；贝克为知名科技私募股权机构 Siris Capital 的联合创始人兼执行合伙人，该机构历史上主导部署的股权投资资本规模已突破 90 亿美元^[3]。

商业含义：在 IBM 加速推进下一代超导量子处理器（如 120 比特方格架构 Nighthawk）并试图将量子计算整合至混合云与企业级数据中心的战略转折期，吸纳擅长大规模科技资产并购、分拆与资本重组的私募操盘手进驻决策层。

格局影响：向金融市场传递出强烈信号，表明 IBM 可能会在未来 12 至 24 个月内对其企业级计算业务组合展开更积极的资本运作，甚至不排除推动量子软硬件业务以独立合资或剥离融资的形式对接公开资本市场。

密码硬件：OEM 设备商启动传统 HSM 换装量子真随机数工程

多家企业级硬件安全设备原始制造商（OEM）推出针对硬件安全模块（HSM，专用密码芯片机箱）的底层架构升级方案，正式将基于微观物理测量原理的量子随机数发生器（QRNG，基于量子真随机物理熵源）作为核心物理熵源，直接替换传统依赖热噪声或时钟抖动的伪随机数发生器模块^[4]。

技术与安全含义：传统伪随机生成器在应对高级持续性威胁及未来计算破解时存在内在算法周期性弱点；引入量子测量塌缩的物理不可预测性，能够从源头阻绝密钥被侧信道或数学逆向推导的风险。

格局影响：直接拉动 ID Quantique、QuintessenceLabs 等量子随机数核心器件供应商的采购订单，并促使金融交易结算中心、国家级密码基础设施及云服务商将量子真随机熵源列入新一代硬件合规采购考量。

人才生态：引力-量子交叉界面微型传感器招聘博士研究生

欧洲前沿科研联合体正式发布关于引力-量子界面量子传感器的全额奖学金博士研究生岗位，选拔具备高精密冷原子干涉与弱力探测背景的研究人员，申请

截止时间锁定在北京时间 2026 年 11 月 15 日
[2]。

行业影响：反映出量子精密测量技术正从常规地磁勘测向引力波探测、微小尺度宏观量子叠加等基础物理前沿演进，跨学科顶尖人才的争夺日趋白热化。

05 学术

学术前沿

密码安全：强化学习自适应攻击使 E91 协议泄露信息量翻倍

理论物理学家与信息安全研究团队在双边去极化信道环境下展开攻防演练，采用强化学习自适应策略的恶意窃听者成功跨越传统静态拦截模型，将无设备依赖 E91 量子密钥分发协议中的霍莱沃信息量（量子信道传输容量）由 0.135 骤升至 0.348，达到了理论窃听信息提取极限的 98% [6]。

技术含义：无设备依赖量子保密通信一直被视作抗衡侧信道漏洞的严格护盾，但该工作证明在真实噪声信道中，动态自适应攻击算法能精准探测并利用信道对称性破缺，在极窄的容错窗口内榨取绝大部分有效信息。

格局影响：迫使下一代量子密钥分发协议与国际标准化组织（如 ETSI、ITU-T）紧急修订参数基准，要求必须将动态噪声自适应监测与更苛刻的保密增强后处理压缩比写入安全规范。

基础理论：实验首次定量测定多粒子系统“集合相干性”

实验物理学家在多光子纠缠实验中首次完整观测并量化了“集合相干性（Set Coherence）”，证实由多个纠缠粒子构成的宏观状态集合具备超越个体叠加态的统一全局关联度量，并实证了经典 BB84 协议中所选取的四种偏振基态构成的集合恰好拥有最大化的集体相干性 [8]。

技术含义：填补了长期以来量子信息论缺乏对粒子集合整体相干能力严格数学与实验测度的空白，为区分多体体系究竟是单纯统计混合还是具备全局量子资源提供了精确的几何判据。

格局影响：为设计新型高容量量子通信字典编码、多用户量子中继多路复用提供了底层度量工具，夯实了多协议抗噪设计的理论根基。

06 影响

今日影响

- 1 **自由空间量子保密通信从暗室走向露天实战：**沙希德·贝赫什提大学利用矢量涡旋光束将大气湍流误码率从 42.0% 压制到 4.8% [9]，直接穿越了 11% 的无条件安全密钥提取红线；同时自适应学习攻击揭示了静态协议窃听泄露信息量激增至 0.348 的风险 [6]。两项进展倒逼物理层采用抗湍流波前、协议层部署动态噪声防御，未来 1 至 2 年需重点关注百公里级野外真实大气长距离链路测试数据。

- 2 **中性原子平台相干极限被改写，常温操控逻辑门渐行渐近**：斯图加特大学成功研制寿命提升 20 倍的圆形里德堡原子，并在室温下抑制黑体辐射实现光镊稳定捕获与 5 微米远程作用^[18]，打破了中性原子激发态毫秒级寿命与液氮制冷的双重禁锢。下一步应紧盯研究团队何时在圆形态原子上执行双比特受控相移逻辑门，并检验其门保真度能否追平乃至逼近当前中性原子基态 99.5% 的公开最好水平。
- 3 **二级市场量子硬件标的从“纯研发讲故事”转向“晶圆代工造血”**：美国银行给予 IonQ 买入评级并定 60 美元目标价，关键驱动力在于其通过收购 SkyWater 实现了 4.5 亿至 4.6 亿美元的晶圆代工造血预期^[1]；同时 IBM 董事会引入拥有超 90 亿美元操盘经验的私募投资人弗兰克·贝克^[3]，传统与新兴巨头均在用产业整合逻辑置换纯学术叙事。下一步应紧盯 IonQ 代工业务的实际毛利率兑现情况，以及 IBM 是否会对其量子计算与软件基础设施启动资本运作。
- 4 **商业密码硬件底座由内而外启动物理量子防御升级**：传统硬件安全模块（HSM）开始成规模升级换装量子随机数发生器（QRNG）作为不可预测的物理真随机熵源^[4]，补齐长期以来依赖算法伪随机数的底层熵源脆弱性。下一步应关注国际金融与网络安全合规机构是否会将量子真随机熵源由“推荐标准”升级为高密金融系统的“强制认证项”。

编辑点评

从本期技术突破脉络可以清晰看出，量子计算与保密通信正经历从“追求极限参数演示”向“驯服恶劣物理现实”的范式切换。以往学术界习惯在接近绝对零度的真空暗室、无湍流理想信道或无记忆白噪声环境中堆叠指标；如今的研究重心明显向真实世界的非理想边界转移——无论是在室温下通过抑制黑体辐射将巨型原子寿命拉长数十倍，在强湍流折射率剧烈扰动的大气中直接压制误码率，还是从数学上正视具有时间记忆效应的低频非马尔可夫噪声。量子硬件的发展逻辑正在从“挑选最干净的环境做演示”，转向“在复杂的物理现实中筑牢抗噪护城河”。

在资本与产业维度，单纯描绘容错量子计算机远景的叙事模式已难以为继。华尔街主流投行给予头部硬件企业的正面评级，其底色是对半导体代工制造等即期业务造血能力的肯定；科技巨头董事会增聘私募股权老将，同样预示着产业整合与资本运作正进入深水区。对于高技术、长周期的硬科技赛道而言，兼顾晶圆制造、物理层抗噪与现有基础设施无缝嵌入的企业，才能在漫长且耗资不菲的纠错黎明到来前，构建起穿透资本周期的生存壁垒。

参考资料

[1]	IQT Sunday Edition	IBM adds Siris co-founder Frank Baker to its board
[2]	PhD position in quantum sensors for the gravity-quantum interface	[4] HSM designs upgrade entropy sources with quantum randomness
[3]		

[5]

Researchers Achieve 93% Constraint Satisfaction Using Quantum Interferometry

[6]

Researchers Boost Eavesdropping Success to 0.348 with Learnt Attacks

[7]

Researchers Simulate Molecular Dynamics Including Nuclear Effects

[8]

Researchers Verify Quantum Coherence with Experiment

[9]

Shahid Beheshti Team Cuts Quantum Errors to 4-8 Per Cent Via Vector Beams

[10]

Researchers Bound Quantum Process Errors Using Total Variation

[11]

Researchers Limit Quantum Noise Loss to Three Percentage Points

[12]

Researchers Bound Sensitivity with NOON States in Optomechanics

[13]

Interference Shows Electrical Properties and a New Capacitance at Low Frequencies

[14]

Researchers Build Efficient Quantum Error Correction Codes

[15]

Adaptive Error Mitigation Improves Quantum Learning Performance to Ninety Four Percent

[16]

Researchers Boost Diamond Defect Readout with 63% Efficiency Gain

[17]

New design removes 98.4% of qubit leakage during measurement

[18]

How attachment theory can help us understand AI relationships

[19]

Scientists Break 3 World Records With Giant Atoms Built for Quantum Computing

[20]

My new course at UT Austin: AI Alignment Theory

量子研究内参

全部期数 · 周刊深度解析 · 每日快报 → qbitbrief.com

FOR RESEARCH REFERENCE ONLY

配图源自所引论文与新闻稿；如引用不规范，请联系编辑部删除。