面向可扩展量子网络的量子中继器基本模块

Wen-Zhao Liu[1,2,3], Ya-Bin Zhou[1,2,3], Jiu-Peng Chen[1,2,3], Bin Wang[3,4], Ao Teng[1,2,3], Xiao-Wen Han[1,2,3], Guang-Cheng Liu[1,2,3], Zhi-Jiong Zhang[1,2,3], Yi Yang[1,2,3,4], Feng-Guang Liu[1,2,3], Chao- HuiXue[1,2,3], Bo-Wen Yang[1,2,3], JinYang[1,2,3,5], ChaoZeng[1,2,3], Du-Ruo Pan[2], Ming-YangZheng[3,4],Xing-Jian Zhang[6], Cao Shen[6], Yi-Zheng Zhen[1,2,3], You Xiao[7], Hao Li[7], Li-Xing You[7], Xiong- Feng Ma[3,8],Qi Zhao[6], Feihu Xu[1,2,3], Ye Wang[1,2,3],Yong Wan[1,2,3],Qiang Zhang[1,2,3,4],和 Jian-Wei Pan[1,2,3]

arXiv:2602.08472v1 [quant-ph] 9 Feb 2026

[1]合肥微尺度物质科学国家研究中心和中国科学技术大学物理科学学院，中国安徽合肥 230026[2]中国科学技术大学上海量子科学研究中心和中国科学院量子信息与量子物理卓越创新中心，中国上海[3]中国科学技术大学合肥国家实验室，中国合肥[4]济南量子技术研究院，中国济南[5]安徽师范大学物理系，中国安徽芜湖 241000[6]QICI量子信息与计算倡议，香港大学计算与数据科学学院，中国香港特别行政区薄扶林道[7]中国科学院上海微系统与信息技术研究所集成电路材料全国重点实验室（SIMIT，中国科学院）[8]清华大学交叉信息研究院量子信息中心，中国北京 100084

量子网络整合量子通信、量子计量和分布式量子计算，可实现安全高效的信息传输、高分辨率传感，并使信息处理速度呈指数级提升[1]。长距离确定性纠缠分发是构建可扩展量子网络的先决条件，可借助设备无关量子密钥分发（DI-QKD）[2,3]和量子隐形传态[4,5] 实现安全高效的信息传输。然而，光纤中的光子损耗随距离呈指数增长，阻碍了高效、确定性的纠缠分发。结合量子存储器、纠缠交换[4,7,8] 和纠缠纯化[9–11] 的量子中继器[6], , 为克服光纤量子网络中的这一限制提供了最有希望的途径。尽管人们已为实现量子中继器[12–25]付出了诸多开创性努力，仍存在一个关键瓶颈：远程存储器间纠缠的退相干速度快于其在长距离上的建立和纯化速度。我们通过开发长寿命囚禁离子存储器、高效电信接口以及高可见度单光子纠缠协议[26,27]，克服了这一难题。这使我们能够在同一距离的平均纠缠建立时间内，于一条 10 km 长的光纤上建立并维持存储器间纠缠。作为直接应用，我们展示了城域尺度的设备无关量子密钥分发，从 10 km 传输的 4.05×10^5 个贝尔对中提取出 1,917 个秘密密钥。我们进一步报告了 101 km 距离下渐近极限中的正密钥率，将可达距离提升了两个数量级以上[28–30]。我们的研究为量子中继器提供了关键构件，标志着迈向可扩展量子网络的重要一步。

量子中继器是克服光纤量子网络中光子损耗随距离呈指数增长这一问题的最有前景方案[6]。量子中继器不直接在用户之间传送光子，而是设置中间节点，并利用量子存储器进行纠缠交换[4,7,8]，以减轻光子损耗。例如，若通过 1,000 km 光纤直接分发纠缠，光子损耗将达到 10^{20},；而引入 10 个中继节点，可将损耗降至约 10^{2}。这种方法能显著提高分发效率，并实现远距离确定性纠缠。作为量子中继器的一项关键前提，量子纠缠必须维持的时间长于每个节点的纠缠建立时间，这样相邻节点才能通过纠缠交换连接起来。此外，高保真确定性纠缠能够实现设备无关量子密钥分发（DI-QKD）。这是量子密码学的终极目标之一，它通过违反贝尔不等式来认证密钥生成，从而提供信息论安全，且不受设备可信度或信道完整性的影响[3,31,32]。

在原子系综[20,23], 单原子[22],和金刚石中的色心[24,25]等各种实验平台上，已成功演示了在城域距离上建立确定性纠缠。然而，在所有这些实验中，由于初始保真度有限且退相干显著，纠缠会在建立所需的时间内消失。因此，这种纠缠无法用于多级纠缠交换或纯化，从而阻碍了实用量子中继器的实现。

本文报道　克服上述挑战的实验实现　　.

我们研发了长寿命的 $^{40}Ca^{+}$ 离子存储器、基于周期极化铌酸锂（PPLN）波导的高效低噪声电信接口，以及一种高可见度的单光子纠缠协议[26,27]。我们在10 km光纤上实现了存储器间纠缠，并具备近乎完美的态读出能力。存储器间纠缠的相干时间为 550 ± 36 ms，超过相同距离下450 ms的平均纠缠生成时间。在后续纠缠轮次成功时，先前纠缠轮次中存储的贝尔对的预期保真度为0.578 ± 0.006。这一结果证实，可以在城域规模节点之间建立并维持多个存储器间纠缠，从而实现多级纠缠交换和纠缠纯化，为可扩展量子网络中的量子中继器提供关键构件。

作为这一基础模块的一项强大应用，我们展示了长距离设备无关量子密钥分发（DI-QKD）。我们在最远 101 km 的光纤距离上建立了保真度超过 0.90 的远程纠缠。纠缠建立后立即进行态测量，以检验贝尔不等式并生成用于设备无关量子密钥分发的密钥。我们从 4.05×10^{5} 个贝尔对中提取出 1,917 个秘密密钥，在 10 km 光纤上实现了正密钥率，并在 101 km 距离上获得了正密钥率。

节点间的先导纠缠

为了在量子网络中建立一条基本链路，我们在两个彼此独立的量子节点 Alice 和 Bob 之间生成纠缠。每个节点都包含一个单独的 $^{40}Ca^{+}$ 离子，并通过长度各异的电信波段光纤相连。每个节点发出的单光子由

高数值孔径（NA = 0.635）物镜收集，耦合进光纤，送入量子频率转换（QFC）模块，再经长光纤传输至中间节点。两个节点之间通过相位稳定的单光子干涉实现纠缠，并由超导纳米线单光子探测器（SNSPD）上的点击事件宣告成功（图 1a）。

在每个节点，离子先经过多普勒冷却，随后对所有运动模态进行电磁诱导透明（EIT）冷却。接着，通过在 $\left|S_{1/2}, m_j = -1/2\right\rangle \leftrightarrow \left|D_{5/2}, m_j = +3/2\right\rangle$跃迁上进行频率选择性光泵浦，将态初始化至 $\left|S_{1/2}, m_j = +1/2\right\rangle \equiv |\downarrow\rangle$，然后再泵浦至 $\left|S_{1/2}\right\rangle$ 流形，典型制备保真度可达 99.9%。量子比特编码在 $|\downarrow\rangle$ 和 $\left|D_{5/2}, m_j = +5/2\right\rangle \equiv |\uparrow\rangle$中，并通过态依赖荧光探测进行读出。

初始化后，单光子的产生分为两个步骤：(i) 在 729 nm跃迁上进行 π旋转，将布居从 $|\downarrow\rangle$ 转移到 $|\uparrow\rangle$；(ii) 施加一个 854 纳米、持续 2.25 ns 的脉冲，使比例为 α的布居经由中间态 $\left|P_{3/2},\ m_j = 3/2\right\rangle \equiv |e\rangle$ 从 $|\uparrow\rangle$ 转移到 $|\downarrow\rangle$（图 2a）。随后产生的 393 nm光子由垂直于量子化轴的定制物镜收集，估计在 σ-跃迁中发射的光子的收集效率为 9%。耦合进入单模光纤（SM300）后，在量子频率转换模块之前测得 Alice 和 Bob 的单光子效率分别为 2.6% 和 2.8%。使用光电倍增管记录的 393 nm光子的时间轮廓反映了激发态 $|e\rangle$ 的自发衰变寿命。该方案在离子的内部态之间产生纠缠

以及光子数态。

393 nm处的单光子被注入由 PPLN波导和 527 nm 泵浦激光器组成的频率转换模块，从而通过单步转换至 1550 纳米（图 1c）。在泵浦功率为 50 mW 时，转换过程固有的宽带噪声在 1550 纳米附近达到 1.3×10^{5} 光子 $s^{-1}\,nm^{-1}$。在相同泵浦功率下，使用 100 GHz 带通滤波器、10 GHz 体布拉格光栅（VBG）和 40 MHz 标准具，可将噪声降至 35 cps，同时保持 28% 的综合透射效率。由于标准具中的振铃衰减，1550 纳米光子出现时间展宽，其半高全宽约为 20 ns（图 2b）。

为了提高空间分离的离子量子比特之间的纠缠生成率，我们采用 SPEP。这需要 Alice 和 Bob 的光场之间保持稳定的相位差[19,20]。Alice 和 Bob 共用一个激光系统，但由彼此独立的电子设备控制。我们采用结合波分复用（WDM）和时分复用（TDM）的稳定方案，补偿来自光源和光路的相位波动。

在波分复用（WDM）方案中，连续波 1548 nm参考激光器在量子频率转换模块之后立即与 1550 纳米信号光子复用（图 1c），从而能够主动抑制光纤链路中的相位噪声。时分复用（TDM）方案则使用一个较弱的 393 nm参考脉冲来补偿缓慢漂移。该脉冲通过此前用于单光子生成的同一组 729 纳米和 854 nm光束进行和频混频而产生（图 1b）。较弱的参考脉冲沿

与信号光子几乎相同的路径传播，并且仅在多普勒冷却期间施加，以避免加热离子的运动态。实施这两种稳频方案后，在中间节点处，通过一条 10 km 光纤链路传输的两个参考脉冲实现了 0.986 ± 0.005 的干涉对比度（图 2d）。

纠缠的表征

SPEP 以如下形式在 Alice 与 Bob 之间产生先导纠缠

$$|\rho_{\mathrm{AB}}\rangle = (1-\alpha)\left|\psi^{\pm}\right\rangle\left\langle\psi^{\pm}\right| + \alpha\,|{\downarrow\downarrow}\rangle\langle{\downarrow\downarrow}|\,, \tag{1}$$

其中 $|\psi^{\pm}\rangle = (|{\downarrow\uparrow}\rangle \pm e^{i\Delta\phi}\,|{\uparrow\downarrow}\rangle)/\sqrt{2}$ 携带来自两个节点的光场之间的差分相位 $\Delta\phi$。预示离子-离子纠缠中的主要误差机制包括：（1）SPEP 固有的两节点同时激发，（2）离子的操作误差与退相干误差，（3）来自量子频率转换和探测器噪声的虚假预示信号，（4）跨节点光场的残余相位波动，以及（5）离子的运动自由度，其中激发–发射循环施加净动量反冲，产生自旋-运动纠缠，从而降低干涉可见度 [33,34]。前四项贡献利用各子模块的实验数据进行量化（补充信息），所有误差的建模如图 3c 所示。值得注意的是，由 α 决定的协议引入的误差与纠缠生成率之间存在权衡。在 $\alpha = 17\%$ 时，该速率达到 2.226 cps，对应平均生成时间为 450 ms（图 3b）。

对于 10 km 光纤链路，~60 mW 的 527 nm 泵浦功率可实现 9.1% 的链路效率，达到

$\alpha = 2.5\%$，噪声水平为 9.6 cps，对应的信噪比超过 100:1（图 2b、c）。我们对预示态 $\rho_{\pm}$（$\alpha = 2.5\%$）进行量子态层析，并确定其相对于理想贝尔态 $|\Psi^{+}\rangle$ 和 $|\Psi^{-}\rangle$ 的态保真度分别为 $F_{\rho_{+}} = 0.923 \pm 0.012$ 和 $F_{\rho_{-}} = 0.910 \pm 0.012$（图 3a）。通过奇偶性测量和布居测量进行的简化估算得出了相符的结果。我们使用 10 km 和 100 km 光纤线圈，测量了纠缠保真度随距离的变化。在固定激发率 $\alpha = 5\%$ 下，由布居测量和奇偶性测量确定的贝尔态保真度基本保持不变，这得益于自旋回波动态解耦对磁场噪声的抑制（图 3c）。

远程纠缠的寿命主要受$\left|D_{5/2}\right\rangle$ 态的自然寿命（1.16 秒）以及磁场噪声导致的退相干限制。使用状态$\left|S_{1/2},\ m_j = -1/2\right\rangle \equiv |s\rangle$ 将纠缠态从 $(|{\downarrow}{\uparrow}\rangle \pm e^{i\Delta\phi}\,|{\uparrow}{\downarrow}\rangle)/\sqrt{2}$ 相干地转移到 $(|{\downarrow}\,s\rangle \pm e^{i\Delta\phi}\,|s\,{\downarrow}\rangle)/\sqrt{2}$。转移分两步完成：首先，利用双色 393 nm 拉曼光束驱动 $|s\rangle$ 与 $|{\downarrow}\rangle$ 之间的受激拉曼跃迁；然后，在每个节点使用 729 纳米激光器，对 $|{\downarrow}\rangle$ 与 $|{\uparrow}\rangle$ 之间施加 π-旋转。随后实施Knill动态解耦（KDD）脉冲[35]，间隔为 0.5 ms，以减轻退相干。

以 $\alpha = 17\%$的激发概率通过10 km光纤链路生成经预告的远程纠缠，随后由上述存储协议对其进行保护。如图3d所示，以 $\langle XX\rangle$的期望值量化的纠缠相干性会随着等待时间的增加而衰减，并且可以通过指数拟合得到良好描述。拟合得到的相干时间为

550 ± 36 ms，对应的退相干率为 1.8 ± 0.1 Hz。量子链路效率定义为纠缠生成率与退相干率之比，计算得出为1.2，超过确定性交付远程纠缠所需的0.83临界阈值[19]。在 $\langle ZZ \rangle$的期望值中观察到线性衰减，我们将其归因于KDD序列重复进行 π旋转期间门误差的累积。独立测量表明，门误差主要由自发辐射导致，Alice节点和Bob节点的单门误差概率分别为 6.1×10^{-4} 和 5.7×10^{-4} 。根据测得的 $\langle XX \rangle$ 和 $\langle ZZ \rangle$期望值，确定纠缠保真度在450 ms时为0.554 ± 0.050 ，这对应于 $\alpha = 17$%时的平均生成时间。纠缠仍受到保护，在最长 547 ± 34 ms的时间内保持高于0.5的保真度（图3(d)）。更多详情请参见补充信息。

预先建立的纠缠只需保持到后续纠缠生成，这样便可利用两对纠缠对进行纠缠交换或纯化。因此，平均保真度按概率加权平均值计算，即对连续纠缠事件之间不同时间间隔所对应的保真度进行加权。通过拟合 $\langle XX \rangle$ 和 $\langle ZZ \rangle$的期望值，并结合时间间隔的概率密度函数，我们可以提取平均保真度。当积分窗口限制为450 ms（平均纠缠生成时间）时，平均保真度为 0.668 ± 0.005。将积分窗口延长至无穷大，平均保真度为0.578 ± 0.006；这代表前一轮纠缠生成中存储的贝尔对在后一轮成功后所具有的预期保真度。

设备无关量子密钥分发协议与结果

作为对该装置所生成的高保真度、高速率确定性纠缠的一项应用，我们展示了通过城域光纤实现设备无关量子密钥分发。实验中使用的设备无关量子密钥分发架构如图4a所示。预告式纠缠生成后，测量设置由输入X和Y决定，分别为Alice和Bob产生输出 a和 b。我们实施了Zhang等人提出的设备无关量子密钥分发协议[32]，该协议在密钥生成和贝尔检验中均采用随机量子测量，并进行相应的安全性分析。我们先前的设备无关量子随机性实验[36] 所生成的随机数用于选择测量基。Alice和Bob分别独立随机选择各自的设置：X， Y $\in \{0,1\}$ 定义贝尔检验轮次，而X $=0$ 和Y $=2$ 定义密钥生成轮次。最后，所有输入和测量结果都记录在相互独立、可信的本地经典存储器中。

我们将一次先导纠缠生成定义为一个实验轮次，并在 10 km 光纤链路上总共进行了 $N = 405,$ 145 个轮次，在大约两个月的数据采集后实现了安全密钥生成（图4b）。采用 Clauser–Horne–Shimony–Holt（CHSH）不等式 [37]评估贝尔检验轮次，得到 $S = 2.5758 \pm 0.0059$；而从密钥生成轮次中提取的量子比特误码率（QBER）为 $Q = 0.0360 \pm 0.0006$。该实验在 386.1 小时的有效累积时间内，实现了平均 0.291 s^{-1} 的纠缠生成率。经过效率为 $f = 1.122$的信息协调以及后续的隐私放大后，累积的 CHSH 和 QBER 数值对应于 1,917 个秘密比特，从而得到

每轮约为 4×10^{-3} 的密钥率；随着纠缠生成事件数量的增加，该密钥率渐近趋近于每轮 0.325（图4c）。对于 100 km 的实现，我们以类似方式累积了 $N = 2,799$ 个轮次，并获得了 $S = 2.504 \pm 0.075$ 和 $Q = 0.069 \pm 0.011$；在无限多密钥生成轮次的极限下估计渐近密钥率为每轮 0.0974，此时这些轮次所占比例趋近于 1（图4d，补充信息）。

总结与展望

在我们的实验中，我们展示了两个长寿命囚禁离子存储器之间远距离的高保真确定性纠缠建立。在 10 km 光纤链路上，远程纠缠得以保持；在随后建立纠缠时，其预期保真度为 0.578 ± 0.006。这为长距离多级纠缠交换和纠缠纯化奠定了关键基础。此外，利用这种高保真远距离确定性纠缠，并连续进行 400 小时的数据采集，我们展示了通过 10 km 链路实现的有限尺寸设备无关量子密钥分发，与此前的演示相比，安全距离扩大了 5,000 倍。[28] 此外，我们还展示了在渐近极限下通过 101 km 链路实现正密钥率的能力，可实现距离扩大两个数量级以上[29,30]。

要实现在数千公里范围内确定性地建立纠缠，我们需要延长量子存储器的相干时间、提高纠缠生成率，并构建多节点网络基础设施。若要进一步延长量子

存储器的相干时间，可以引入具有钟跃迁的离子种类作为存储量子比特[38]，或采用将相干性编码在无退相干子空间中的多离子存储器[39]。若要提高远程纠缠速率，可以采用光学腔增强光子收集[40],，或利用可重构线性离子链[41]在每个节点中俘获更多离子，并配备独立寻址激光器，从而通过复用线性提高预告概率。若要构建多节点网络基础设施，独立激光系统之间的跨节点光频率与相位基准至关重要。在当前实现中，多个波长间的慢漂移补偿仍不可避免；在每个节点部署频率梳，以同时实现本地和远程光学相位基准，将是此类现场演示不可或缺的组成部分。

实现数千公里范围内的确定性纠缠，将使设备无关量子密钥分发（DI-QKD）和任意量子态的超长距离传输成为可能，从而实现安全高效的城际量子信息传输，并支持全国性量子网络的发展。

参考文献

1. Kimble, H. J. 量子互联网。《自然》**453**, 1023–1030 (2008).

2. Bennett, C. H. & Brassard, G. 量子密码学：公钥分发与抛硬币。*IEEE*计算机、系统与信号处理国际会议论文集175–179 (1984).

3. Ekert, A. K. 基于贝尔定理的量子密码学。《物理评论快报》**67**, 661–663

（1991）。

4. Bennett, C. H.等 通过双重经典信道和爱因斯坦-波多尔斯基-罗森信道传送未知量子态。《物理评论快报》 **70**, 1895 (1993)。

5. Bouwmeester, D.等 量子隐形传态实验。 《自然》 **390**, 575–579 (1997)。

6. Briegel, H.-J., D¨ur, W., Cirac, J. I. & Zoller, P. 量子中继器：不完美局域操作在量子通信中的作用。 《物理评论快报》 **81**, 5932 (1998)。

7. Zukowski, M., Zeilinger, A., Horne, M. & Ekert, A. ”事件就绪探测器”贝尔实验与纠缠交换。 《物理评论快报》**71** (1993)。

8. Pan, J.-W., Bouwmeester, D., Weinfurter, H. & Zeilinger, A. 纠缠交换实验：使从未相互作用过的光子发生纠缠。 《物理评论快报》**80**, 3891 (1998)。

9. Bennett, C. H. 等通过噪声信道实现噪声纠缠的纠缠纯化与保真隐形传态。《物理评论快报》**76**，722（1996）。

10. Deutsch, D. 等噪声信道上的量子隐私放大与量子密码学的安全性。《物理评论快报》**77**，2818（1996）。

11. Pan, J.-W., Gasparoni, S., Ursin, R., Weihs, G. & Zeilinger, A. 任意未知态的实验性纠缠纯化。《自然》**423**，417–422（2003）。

12. Chou, C.-W.等 用于可扩展量子网络纠缠分发的功能性量子节点。《科学》**316**，1316–1320（2007）。

13. Moehring, D. L. 等 相距遥远的单原子量子比特纠缠。《自然》**449**，68–71（2007）。

14. Yuan, Z.-S. 等演示了一个BDCZ量子中继器节点。《自然》**454**, 1098–1101 (2008).

15. Hofmann, J. 等相距甚远的原子之间的先导纠缠。《科学》**337**, 72–75 (2012).

16. Bernien, H. 等相距三米的固态量子比特之间的先导纠缠。《自然》**497**, 86–90 (2013).

17. Hucul, D.等利用光子和声子实现原子量子比特的模块化纠缠。*NaturePhys* **11**, 37–42 (2015).

18. Delteil, A.等生成相距甚远的空穴自旋之间的先导纠缠。*Nature Phys***12**, 218–223 (2016).

19. Humphreys, P. C.等在量子网络上确定性交付远程纠缠。《自然》**558**, 268–273 (2018).

20. Yu, Y. 等人通过数十公里光纤实现两个量子存储器之间的纠缠。《自然》**578**，240–245（2020）。

21. Stephenson, L.等人 在基本量子网络中实现量子比特的高速、高保真度纠缠。《物理评论快报》**124**, 110501（2020年）。

22. Van Leent, T. 等人 通过 33 千米电信光纤实现单原子纠缠。《自然》**607**, 69–73（2022年）。

23. Liu, J.-L. 等。 在城域量子网络中创建存储器间纠缠。《自然》**629**，579–585（2024年）。

24. Knaut, C. M. 等。 电信网络中纳米光子量子存储节点的纠缠。《自然》**629**，573–578（2024年）。

25. Stolk, A.J. 等。 城域规模的固态量子比特先导纠缠。*Sci. Adv.* **10**，eadp6442（2024年）。

26. Cabrillo, C., Cirac, J. I., Garcia-Fernandez, P. & Zoller, P. 通过干涉创建远距离原子的纠缠态。*Phys. Rev.A* **59**，1025（1999年）。

27. Duan, L.-M., Lukin, M. D., Cirac, J. I. & Zoller, P. 利用原子系综和线性光学进行长距离量子通信。《自然》 **414**，413–418（2001年）。

28. Nadlinger, D. P. 等。 通过贝尔定理认证的实验性量子密钥分发。《自然》 **607**, 682–686 (2022年).

29. Zhang, W. 等。 面向远距离用户的设备无关量子密钥分发系统。《自然》 **607**, 687–691 (2022年).

30. Liu, W.-Z.等 迈向设备无关量子密钥分发的光子学演示。《物理评论快报》**129**, 050502（2022年）。

31. Mayers, D. & Yao, A. 使用不完善装置进行量子密码学研究。载于第*39*届计算机科学基础年度研讨会论文集（第*98CB36280*号），503–509（IEEE，1998年）。

32. Zhang, X., Zeng, P., Ye, T., Lo, H.-K. 与 Ma, X. 量子互补性方法实现设备无关安全。《物理评论快报》**131**，140801（2023年）。

33. Eschner, J., Raab, C., Schmidt-Kaler, F. 与 Blatt, R. 单原子及其镜像的光干涉。《自然》**413**，495–498（2001年）。

34. Slodi˘cka, L. 等。 通过单光子探测实现原子间纠缠。《物理评论快报》 **110**, 083603（2013年）。

35. Souza, A. M., Alvarez, G. A. 与 Suter, D. 适用于量子计算和量子存储器的稳健动力学解耦。《物理评论快报》**106**，240501（2011年）。

36. Liu, W.-Z. 等。 抵御量子侧信息的设备无关随机数扩展。《自然·物理》**17**，448–451（2021年）。

37. Clauser, J. F., Horne, M. A., Shimony, A. & Holt, R. A. 检验局域隐变量理论的实验方案。《物理评论快报》**23**, 880 (1969).

38. Drmota, P.等囚禁离子量子网络节点中的稳健量子存储器。《物理评论快报》**130**, 090803 (2023年).

39. Kielpinski, D.等. 利用囚禁离子实现的无退相干量子存储器。《科学》 **291**, 1013–1015（2001年）。

40. Krutyanskiy, V. 等. 相距230米的囚禁离子量子比特之间的纠缠。《物理评论快报》**130**, 050803（2023年）。

41. Canteri, M. 等 囚禁离子的光子接口十量子比特寄存器。《物理评论快报》**135**, 080801（2025年）。

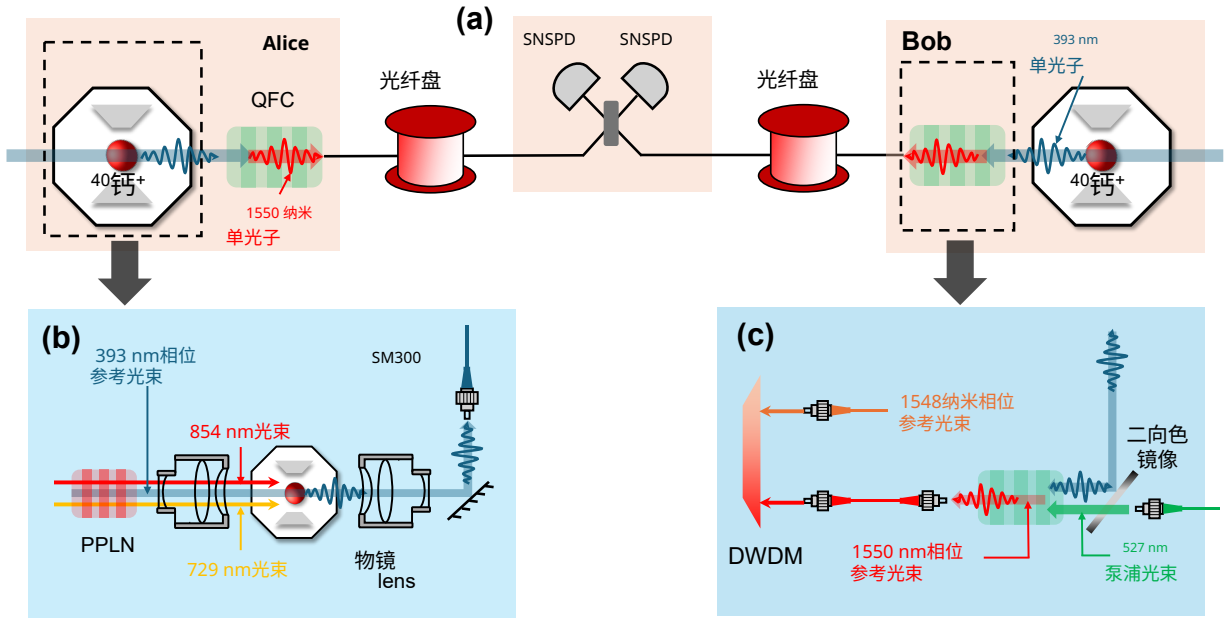

图 1：**实验装置示意图：** (a) 实验装置概览。由两个独立囚禁离子节点产生的单光子在光纤线轴中点处发生干涉。在中间站任一探测器成功探测到光子，即可 herald 离子间纠缠。(b) 用于相干态操控和单光子产生的 729 和 854 nm 激光束沿物镜光轴射入离子阱。同样的光束还会在离子阱前通过和频产生生成 393 纳米相位参考脉冲。(c) 393 nm光子与 527 纳米泵浦激光束在二向色镜处合束，并通过基于波导的差频产生转换为 1550 纳米。1548 纳米相位参考光束通过密集波分复用器（DWDM）耦合进入光链路，以预稳定长光纤。

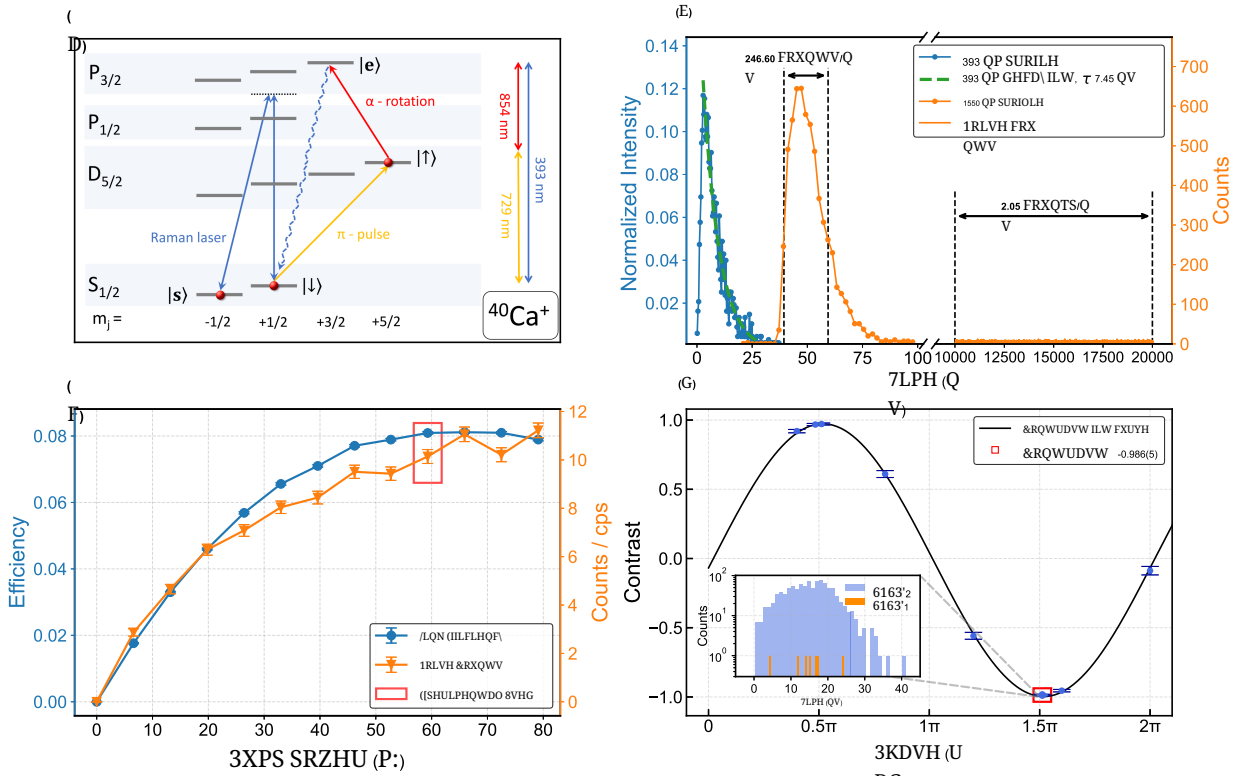

图2：**纠缠生成：** （a）钙-40离子的能级图，展示

通过亚稳态 $|\uparrow\rangle$和激发态 $|e\rangle$生成单光子，并利用拉曼跃迁在两个塞曼子能级 $|\downarrow\rangle$和 $|e\rangle$ 之间进行单量子比特旋转。(b) 使用光电倍增管和 SNSPD 分别探测到的 393 nm 和 1550 纳米单光子的时间轮廓。(c) 经 10 km 光纤链路传输后，量子频率转换模块（393 nm→1550 nm）的效率和噪声特性随 527 nm 泵浦功率的变化。(d) 相位参考激光器的对比度测量，同时显示相应的标准差。插图显示了最大对比度处的探测器计数直方图。

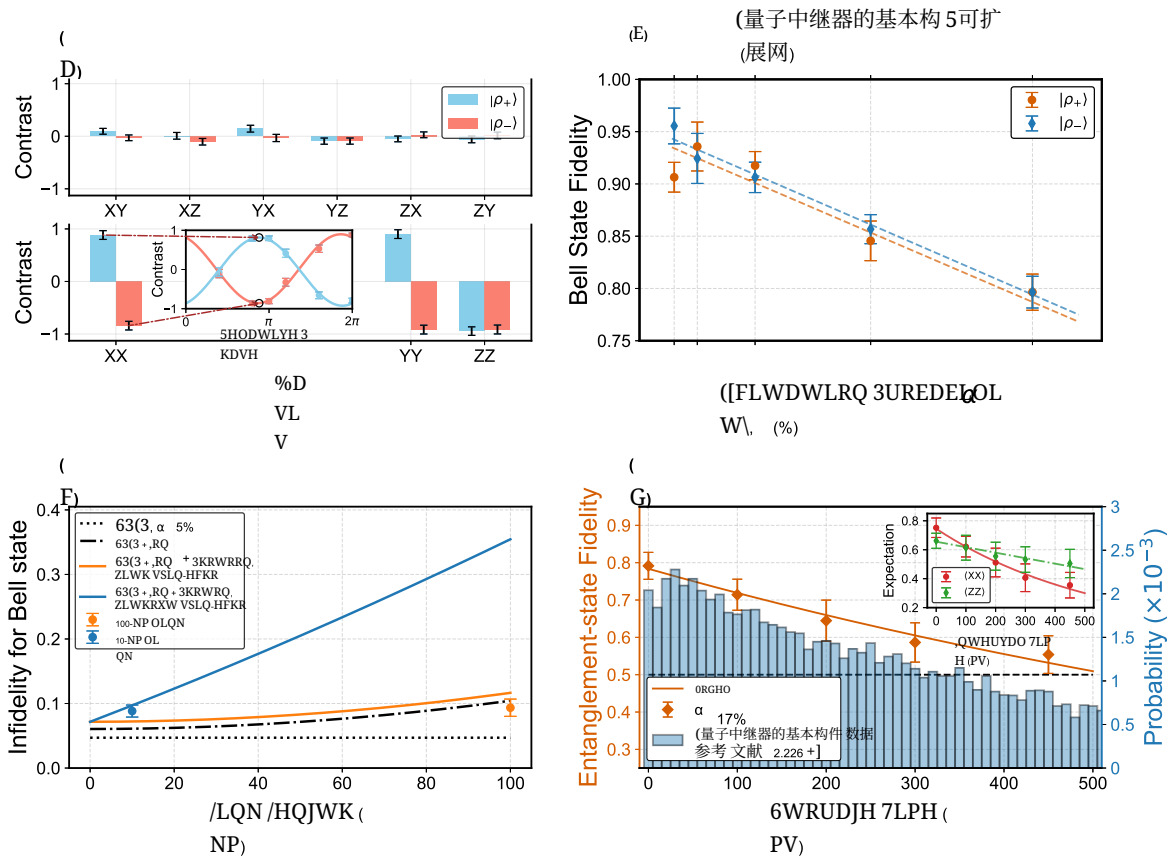

图 3：**纠缠保真度：**(a) 在光纤长度为 10 km 时进行的量子态层析和 $\langle XX\rangle$奇偶性分析，误差条表示标准差。X、Y 和 Z 分别表示泡利算符 σ_x、 σ_y和 σ_z。(b) $\rho_{\pm}$ 态的保真度，误差条表示标准差，该保真度根据布居和奇偶性测量结果提取，并作为激发参数 α 和纠缠生成率的函数表示。(c) 不保真度随光纤长度的变化，误差条表示标准差。各项贡献分别归因于协议引起的误差（1）、离子相关效应（2、5）和光子相关因素（3、4），编号沿用正文中的定义。(d) 对于不同的存储时间，图中显示了纠缠保真度（橙色方块）；相应的 $\langle XX\rangle$（红色圆圈）和 $\langle ZZ\rangle$（绿色菱形）的期望值显示在插图中。误差条表示一个标准差。图中还绘制了两个连续纠缠事件之间间隔的概率分布，分箱宽度为 10 ms。

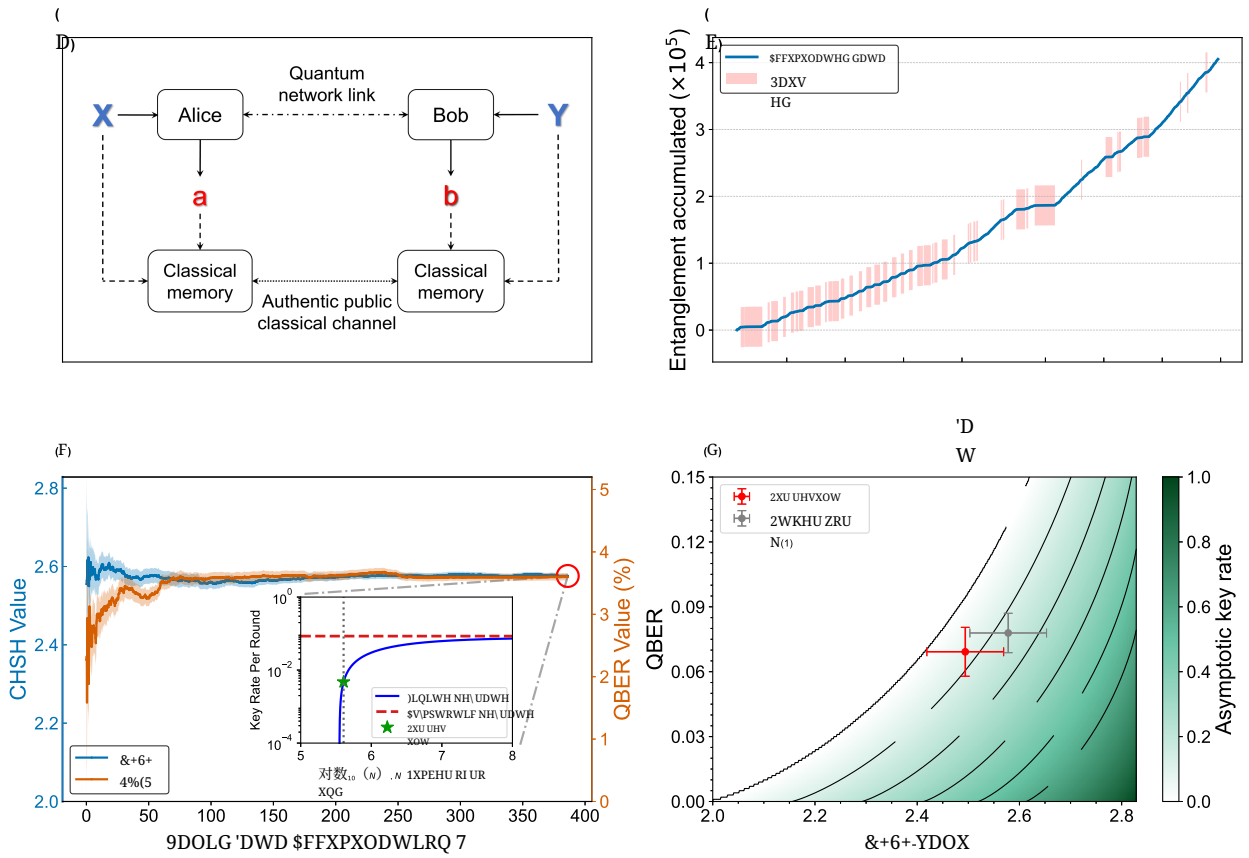

图 4：**设备无关量子密钥分发结果：**(a) Alice 和 Bob 通过量子网络链路相连。双方分别接收输入 X 和 Y，并生成输出 a 和 b。结果保存在本地，并通过经认证的公共经典信道传送，以进行后处理。(b) 蓝色曲线：数据随时间的累积；红色区域：系统恢复期间的暂停。(c) 累积的 CHSH（蓝色）和量子比特错误率（橙色）数值，阴影区域表示一个标准差的不确定性。插图：通过 10 千米光纤链路进行的有限密钥设备无关量子密钥分发，总失败概率为$\epsilon = 10^{-5}$。(d) 对通过 101 千米光纤进行的设备无关量子密钥分发开展的无限密钥分析。结果显示的是密钥生成轮次比例趋近于 1 时的极限；误差棒表示 CHSH 值和量子比特错误率的一个标准差，并与参考文献[29]进行比较。