arXiv:2303.11810v1 [quant-ph] 21 Mar 2023

太空基础科学中的量子存储器

Jan-Michael Mol[1,*], Luisa Esguerra[2,3], Matthias Meister[1], David Edward Bruschi[4], Andreas Wolfgang Schell[5], Janik Wolters[2,3] 以及 Lisa Wörner[1,†]

[1]德国航空航天中心（DLR），量子技术研究所，德国乌尔姆 [2]德国航空航天中心（DLR），光学传感器系统研究所，德国柏林 [3]柏林工业大学，光学与原子物理研究所，德国柏林 [4]量子计算分析研究所（PGI-12），于利希研究中心，德国于利希 52425 [5]固体物理研究所，汉诺威莱布尼茨大学，德国汉诺威 30167

（日期：2023年3月22日）

探究并验证量子力学基础与广义相对论之间的联系，需要极其灵敏的量子实验。为了深入洞察这一引人入胜的物理学领域，迟早有必要在太空开展专门的实验。量子技术，尤其是量子存储器，凭借数十年来不断进步所奠定的先进发展水平，为取得确凿的实验结果提供了新方法。长时间存储量子态，将使人们能够在天文尺度的基线上开展贝尔检验，提高研究引力效应对量子系统影响时的测量精度，或实现由量子传感器和时钟构成的分布式网络。本文主张利用量子存储器在太空开展基础物理学研究，并探讨若干具体实验，以及潜在的量子存储平台及其性能。

* jan-michael.mol@dlr.de

† lisa.woerner@dlr.de

I. 引言

量子技术目前正逐步拓展至可行的公共和商业应用，同时不断增强其在工程和应用科学领域的能力。人们越来越有兴趣将这类技术部署到太空，以推进安全量子通信 [1, 2]、助力分布式量子计算 [3、5], 改进传感 [6], 并开展基础物理学实验检验 [7, 8]。冷原子实验室[9] 和 MAIUS [10] 任务已成功展示了在太空运行复杂量子系统的能力，并在太空中运行了玻色–爱因斯坦凝聚体（BECs）。即将开展的 BECCAL [11] 项目将以此为基础，开展大量新实验，其中包括在太空运行量子存储器。由于量子存储器是未来量子通信系统的重要组成部分，此次任务的研究成果将为全球量子网络适用太空的硬件进一步发展提供参考。

一般而言，量子存储器可以存储给定的量子态，例如单光子的量子态，并在一段特定时间后于稍后的某个时刻将其读取。这里的关键在于，存储和读取过程能够保留此前建立的所有量子特性，例如纠缠和量子相干性。如此一来，量子存储器便能在大幅提升众多科学和技术应用方面发挥关键作用，例如量子态隐形传态和长距离贝尔检验 [12–16] ，并助力设计新的广义相对论量子检验 [17–21]。

因此，我们强调，星载量子存储器对于开展长距离、长时间尺度的基础量子物理实验至关重要。尽管本文主要关注具有较长相干时间的量子存储器，但大规模量子网络和远距离量子通信需要借助量子存储器作为子组件的量子中继器（见图 1）。在连接节点处对入射信号进行贝尔态测量（BSM），是实现两方之间纠缠分发的基础。为跨越较长距离，中继器因此可用于应对损耗并扩大信号传输范围。中继器必须具备接收和发送信号的元件，并能对信号本身进行 BSM。在这种配置中，量子存储器通过分别将光子存储一段所需时间，使两个入射信号同步。原则上，可以在通信双方之间线性连接多个中继器，从而跨越越来越远的距离，而唯一的限制是整体信道保真度。

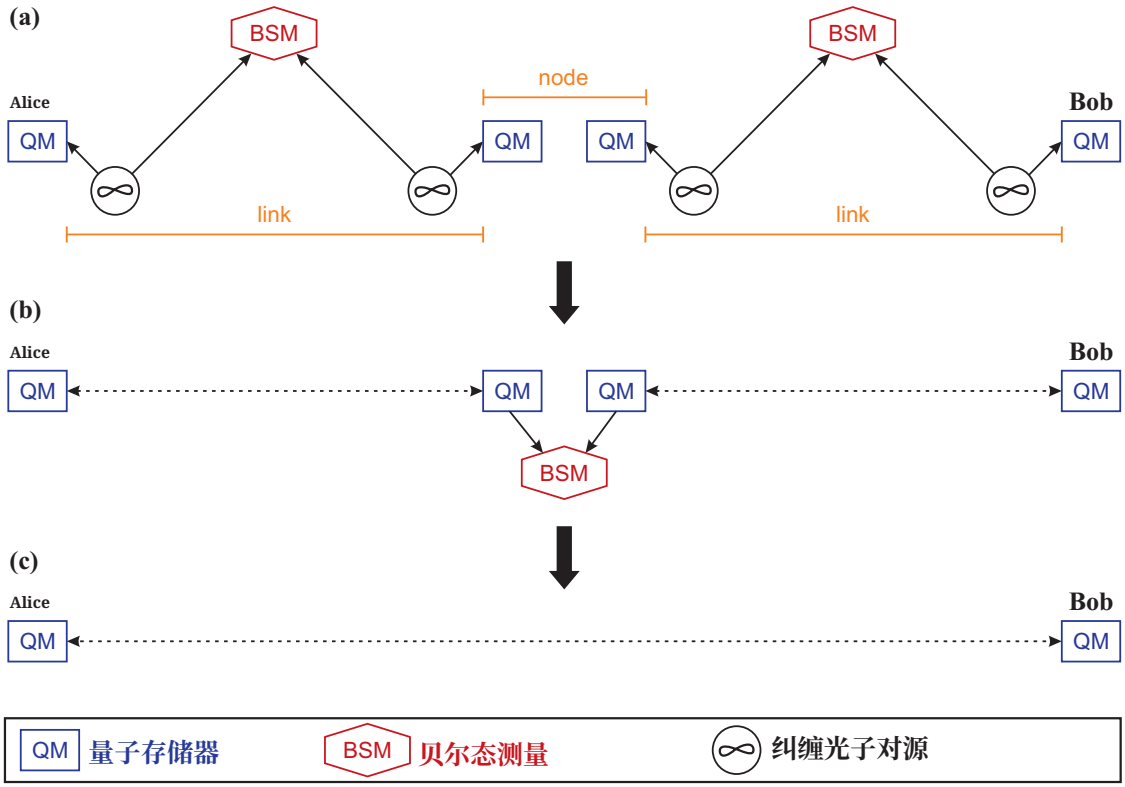


图1. 单节点量子中继网络。(a) 首先，Alice 和 Bob 各自将本地量子存储器与中继节点处的量子存储器纠缠。(b) 两条纠缠链路建立后，在两个节点存储器之间进行另一次贝尔态测量，即可生成 (c) 中通信双方之间的纠缠链路。在这一方案中，存储器在纠缠链路生成的同步过程中发挥着关键作用。还可以串接更多节点，以增加链路数量，从而跨越越来越远的距离。

量子中继器中实用存储器的性能要求远高于简单光纤延迟环所能达到的水平；光纤延迟环无法提供按需读取，而且存储时间越长（即光纤越长），其固有损耗也越显著。若要实现更长时间的存储和按需读取，可以选择其他类型的存储器，相关内容将在第 III 节讨论。最终，所需的存储时间很大程度上取决于具体应用。例如，测量引力效应可能需要比量子安全信息传输（第 II 节）更长的相干时间。

将量子存储器与太空中的自由空间光子链路相结合，有助于克服仅在地面开展实验的若干局限：它能够减轻长距离光纤链路或大气层造成的损耗 [22–24], , 延伸有限的视线范围，或提供低扰动的微重力

环境 [25]。理论上，地球上的基于存储器的量子中继器也能弥补光学损耗，但所需的中继器数量构成了重大挑战[24, 26]。为说明太空运行的优势，搭载于“墨子号”卫星的空间尺度量子实验已表明，与基于光纤的方法相比，量子纠缠分发距离可提升一个数量级 [27]。在该任务中，飞行器搭载了纠缠光子源，而探测和测量仍在地面进行。因此可以得出结论：在存储器辅助地面节点上使用量子存储器，并配合多颗卫星，是进一步扩大纠缠分发距离的下一步。最后，可将中间节点移至卫星上，从而避免光信号不必要地穿过大气层，提升保真度[28, 29]。以这种方式构建太空量子网络，不仅有助于建立未来的全球量子通信网络，也可用于太空基础科学研究。

在第 II 节中，我们将展望星载量子存储器如何改进太空中的各类实验。图 2展示了若干应用场景，包括长距离贝尔检验（第 IIA 节）以及对引力效应或运动效应的测量（第 II B 节和第 IIC 节）。随着更大规模网络的建成，更精确的计时（第 II D 节）和分布式传感（第 IIE 节）等任务也将成为可能。

第 III 节将介绍现有方案，以及不同量子存储平台的要求与局限性，并重点讨论热蒸气池、冷原子气体、稀土离子掺杂晶体、金刚石色心，以及腔中的单原子和离子。最后，我们将总结未来面临的工程挑战。

II. 太空中的存储器辅助基础科学

基于空间的量子科学正日益受到关注。过去几年里，人们提出了许多潜在任务，旨在研究太空中的各种量子现象 [8, 19, 30, 31]。正如我们将在以下小节中看到的，有些提案要求远距离用户之间的纠缠能够长时间保持；与之相反，另一些提案主要要求安全地存储量子态，但不一定要存储较长时间。

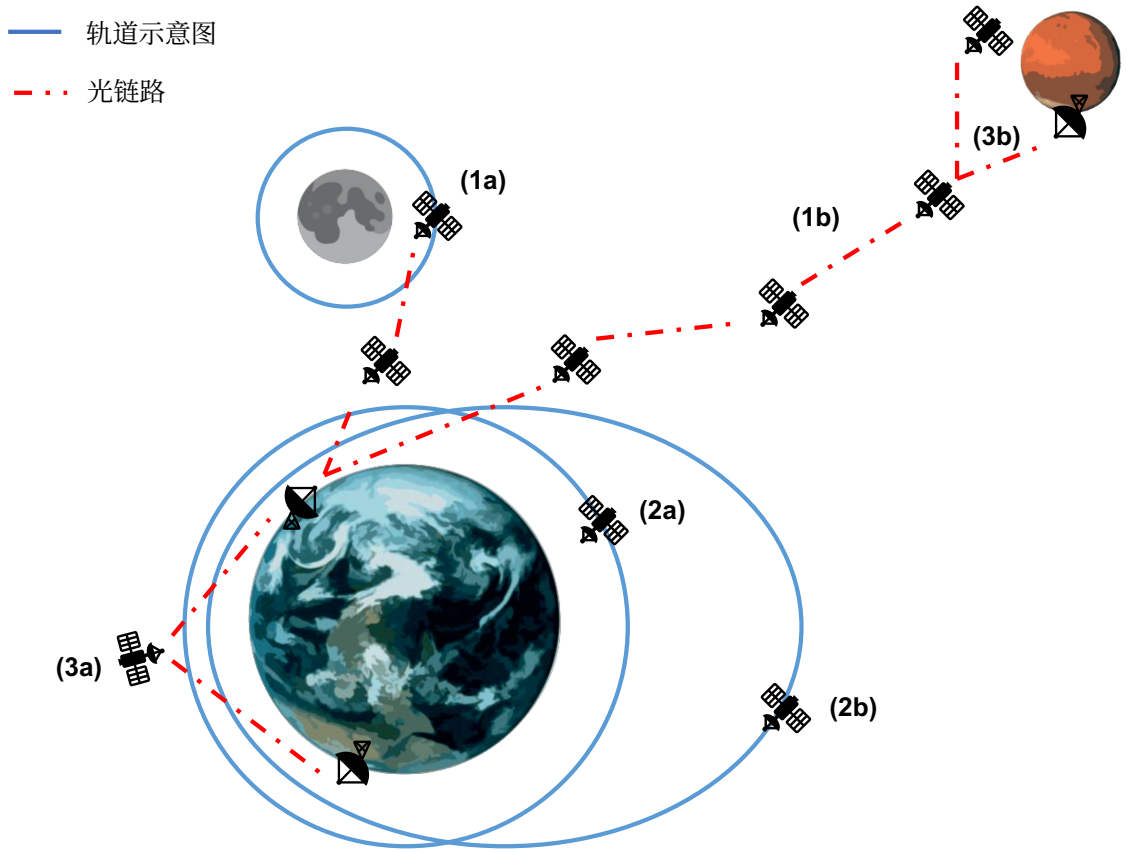


图 2. 空间量子存储器的示例应用。案例 1 介绍长距离贝尔检验，其中量子存储器被部署为基于卫星的中继器的一部分，以桥接远距离；或用于在本地存储光子，以满足类空分离要求（第 IIA 节）。图中展示了涉及地面站、运输飞行器以及环绕月球 **(1a)** 或火星**(1b)**的测量。案例 2 展示了由引力梯度引起的相位采集过程。一个纠缠光子被发送至卫星并存储在星载存储器中，而它的伙伴光子则存储在地球上。**(2a)** 和**(2b)** 展示了这类实验中不同的可行轨道，可用于比较测量（第 IIB 和 II C 节）。案例 3 描述了两个远距离站点之间的量子信息传输。这些站点既可以设在地球上**(3a)**，也可以设在另一个天体上**(3b)**。这两种情况都已在其他文献中介绍过，并且需要借助量子中继器网络实现全球覆盖和远距离传输[28]。然而，按照当前技术，要构建一个通往火星的示例性网络桥接系统，可能需要一万多个运行节点。这是一个重大挑战，深空应用要实现这一目标仍需解决这一问题。

A. 长距离贝尔检验

量子力学的哥本哈根诠释得出结论：自然理论不可能同时满足局域性和实在论。约翰·斯图尔特·贝尔通过一个不等式对此作出了数学表达，该不等式给出了同时遵循实在论和局域性的远距离粒子测量结果之间关联的上限。众多量子物理实验已证明该不等式会被违反 [32–35], 其中一些实验甚至排除了探测漏洞和局域性漏洞。然而，为了在这些实验中达到统计显著性，对时间上连续进行的测量取平均会产生记忆漏洞；这一漏洞只能从统计层面排除，而无法从根本上排除。更长的基线有助于让所有测量之间形成真正的类空分离，从而也能弥补这一漏洞。

虽然进行更远距离的贝尔检验并不一定需要量子存储器，但量子存储器可以储存部分纠缠量子态，直到能够同步进行测量并满足类空分离要求，从而有助于此类检验。一种简单的实验装置可以由纠缠光子对源构成：将其中一个光子暂存于本地的量子存储器中，以便延迟测量；同时将另一个光子发送到远程位置。这种配置无需第二条分发基线，因此只需要一条长基线。暂且不考虑各种漏洞，为了证明这一方法在技术上可行，可以在地面设置一个纠缠光子对源和一个量子存储器，将一个光子发送至低地球轨道（LEO）卫星进行探测；该卫星位于地面上方 $\sim 200 - 2000\,\mathrm{km}$ 处。这种存储器所需的相干时间为毫秒量级，目前的存储器已实现这一水平 [36, 37]。

再进一步，光源和存储器可以放置在低地球轨道卫星或国际空间站（ISS）上，并与绕月球运行的探测器建立连接。这使得贝尔检验能够考察“自由选择”漏洞：两名分别位于月球和地球上的实验者可以在光子飞行期间确定各自的测量基 [8]。在这种情况下，所需的存储器相干时间将增加到一秒以上，这对当前单光子水平的存储器构成了挑战；但多光子态 [38, 39]可存储数小时的存储时间，让人们对在不久的将来实现这一目标抱有希望。

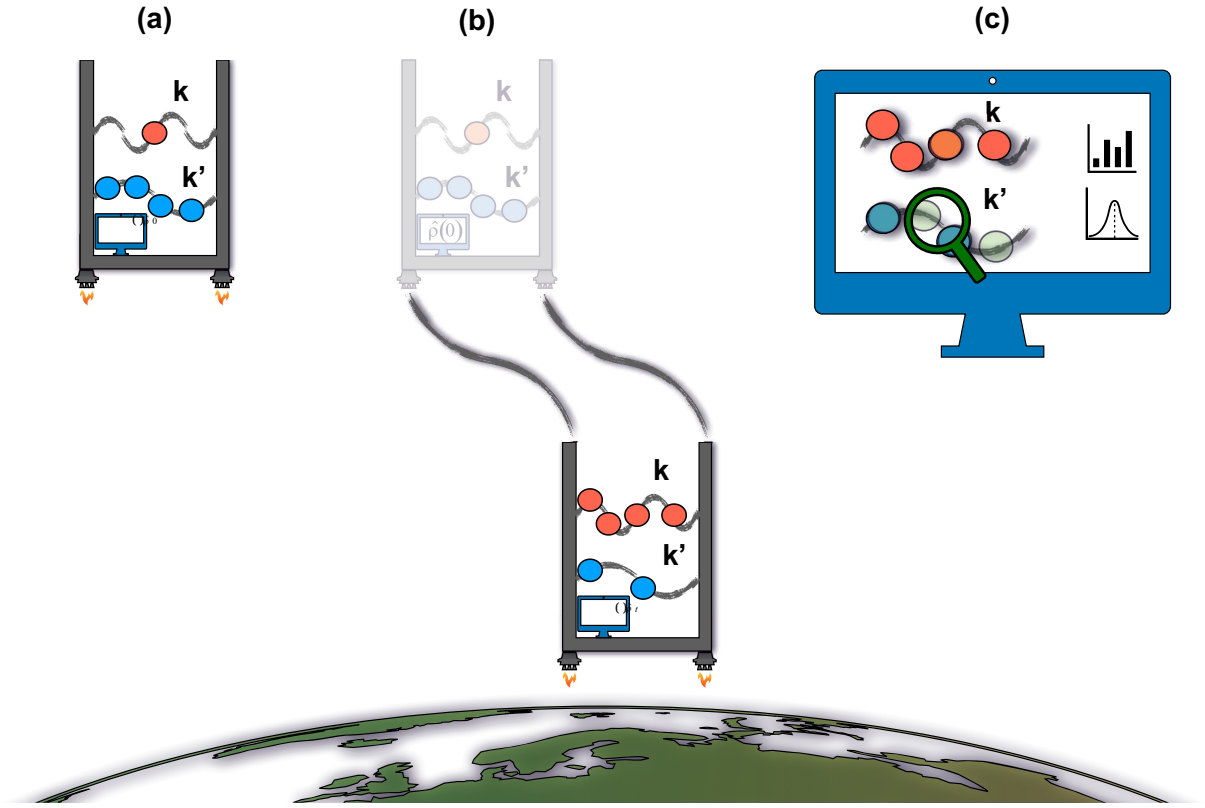


图 3。（a）一个量子存储器被放置在太空中。编码所需信息的自由度的初始态为 $\hat{\rho}(0)$。（b）搭载该存储器的航天器移动一段时间 t 后，量子系统的状态发生改变。（c）一般而言，实际构成存储器的量子系统的状态 $\hat{\rho}(t)$——例如量子场的模式 k 和 k′ ——会与其他自由度（轻微）纠缠，从而影响忠实地取回最初存储的量子态的能力。随后，利用量子计量学技术，获得相关参数测量精度的界限。

B. 弯曲时空对局域量子系统的影响

提高测量精度有助于开发新技术，也有助于发现新的物理效应。在本研究关注的情境中，待测量的量很可能编码在位于不同地点（即节点）的自由度中，或者任务所需利用的资源将分布在太空中 [17]。一般而言，量子场的模式或其他自由度会在同一地点内、不同地点之间，或两者兼有地发生纠缠。一个或多个节点持有量子存储器，其中存储着信息或量子态；这些节点可能经历会影响纠缠的物理过程

共享。这可能会损害精度，因为信息有效地流失到不需要或无法访问的自由度中；但如果恰当设计这些变化，也可能提升整体精度。对整个实验装置的改动可能包括承载存储器的一个或多个航天器的运动 [17] ，或局部时空曲率发生强烈的动态变化 [40]。量子计量学这一领域提供了相关理论框架，用于求得在这些情况下可进行的测量所能达到的精度界限。

量子计量学利用纠缠等真正的量子特性，使（量子）技术有望超越当前最先进水平 [41]。在此背景下，幺正演化 $\hat{U}(\vartheta)$ 会变换初始态 $\hat{\rho}(0)$，并将感兴趣的参数 ϑ 编码到最终态中。例如，引力波的作用会影响存储在太空中某个量子存储器内的量子态。具体而言，我们有 $\hat{\rho}(0) \to \hat{\rho}(\vartheta) = \hat{U}(\vartheta)\,\hat{\rho}(0)\,\hat{U}\dagger(\vartheta)$。可达到的精度 $\Delta\vartheta$ 下界由克拉美-罗界 $\Delta\vartheta \geq (N\mathcal{H})^{1/2}$ 给出，其中 N 是测量次数或输入的单个量子态数量，而 $\mathcal{H}$ 是量子费舍尔信息（QFI）[42]。这一重要的信息论量与在希尔伯特空间 [43]中区分相邻量子态的（理论）操作方法有关。如今，实验室已常规开展量子态测量。然而，许多新效应存在于这样的时间尺度上：在此期间，几乎不可能维持量子系统的量子相干性。量子存储器可以弥合这一差距，使量子态得以维持足够长的时间，让这些效应发生。

一个特别值得关注的情形是运动腔内纠缠的动态生成。研究表明，能够囚禁量子场的腔的（相对论性）运动不仅可以产生粒子，即著名的动态卡西米尔效应（DCE） [44], ，还可以在场激发之间产生量子关联 [45–48]。对运动效应的系统研究揭示了相关变换的性质，以及如何对其进行设计以产生不同的（纠缠）量子门 [49, 50]。随后，研究人员开发了具体技术，将量子计量学的概念应用于相对论情境，并提出了一种理想应用：利用玻色–爱因斯坦凝聚态（BEC）内声子的纠缠态进行引力波传感[40]。这些研究假设光学腔具有无限刚性。对于原理验证研究而言，这是一个很好的近似，但必须考虑腔的弹性性质。在相同的研究背景下，这一点可以做到，且已成功开展了相关的初步尝试 [51, 52]。要全面表征系统并将这些因素纳入具体任务提案，还需要开展更多研究。

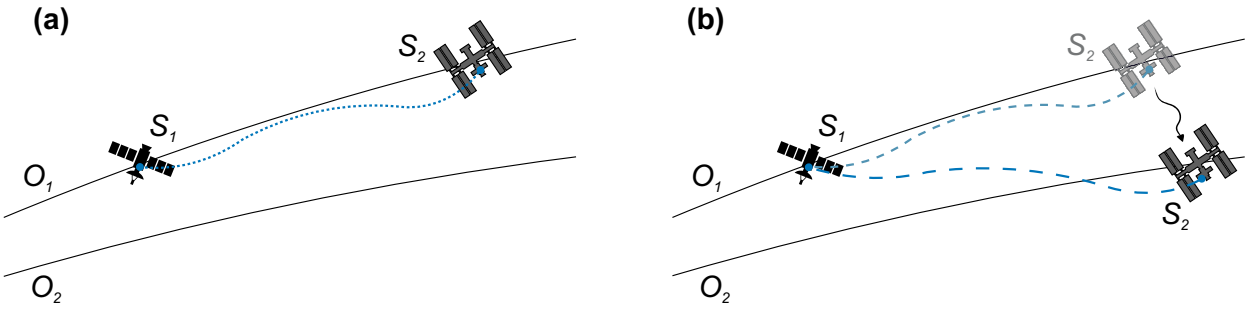


图 4. **(a)** 两颗卫星 S_1 和 S_2 沿同一条轨道路径 O_1运行。因此，它们都是惯性的。卫星内部搭载的两个存储器彼此纠缠（以虚线表示）。 **(b)**卫星 S_2 进行一次机动，使其进入轨道 O_2, ，并再次成为惯性系。轨道转移过程不可避免地要求卫星 S_2 在一段时间内处于非惯性状态。在此过程中，由于非惯性运动对受限量子系统的影响，存储器之间的纠缠将发生变化，如图 3(a,b) 所示。

因此，基于相对论性量子场的精密测量是一条颇具前景的途径，但要长时间维持量子态以供后续处理仍存在困难。这里的关键问题在于如何存储所产生的量子态，同时使腔处于隔离环境中，从而减少机械振动以及受地球束缚所带来的其他限制。存储后，场的状态可能受到囚禁存储器的支撑结构运动的影响，进而也会影响该状态中原本存在的纠缠。研究表明，经过专门设计的共振会使相关效应（对纠缠或平均粒子数的影响）随时间呈线性或二次增强 [50]。粗略估算表明，在所考虑的微扰区间内，光子腔中的作用时间越长越理想。然而，如果特定存储器固有的特征频率低于光的特征频率，情况则有所不同。研究表明，支撑多体系统（例如玻色–爱因斯坦凝聚态中的声子）的声子微扰会受到引力和运动的影响，因此这里讨论的技术同样适用。这意味着，特征频率较低的量子存储器能够在更短时间内呈现更显著的效应。图3中展示了此类情形。

C. 运动引起的纠缠动力学

量子存储器还可用于提高纠缠相关测量的灵敏度。对于这些应用，需要长时间存储量子态，以探测变化的引力环境中的效应 [53]。例如，有一项提案提出使用两团纠缠冷原子气体来探测引力或加速度引起的退相干[17]。通过使用分别位于两艘不同航天器上的两个存储器，当它们处于同一轨道、对应于共享的惯性参考系时，初始联合量子态会使两个存储器纠缠起来。之后，其中一艘航天器加速进入另一条轨道。正如IIB中所讨论的，已有研究表明，腔的运动会影响其中受限的局域系统的量子态，例如量子场的场模式 [45] 或玻色–爱因斯坦凝聚态的声子模式[40]。因此，移动腔内各模式的自由度与其他量子系统之间共享的任何纠缠也预计会受到影响。根据合理灵敏度所需的相干时间估计，从 100 ms [17] 到数秒或数分钟不等，具体取决于是否采用较为保守的假设。此处可能需要具备复用能力，以便通过统计数据产生足够高的信噪比，具体取决于存储效率和保真度。该方案如图4所示。

D. 利用量子存储器提高时钟精度

精确计时不仅对标准化 [54], 具有重要意义，也关系到全球卫星导航系统等应用中的定位精度，或可用于绘制引力势分布图[55]。在经典时钟网络中共享计时信息，已经可以通过经典平均来降低相关节点的阿伦方差。为进一步提高计时精度，有人提出在太空有限体积范围内分布由 N 个时钟构成的量子网络 [56]。借助量子纠缠，时钟节点有望通过共享量子态来测量并稳定网络的平均频率，而不必像经典方式那样分别运行和校正每个节点。对于较短的平均时间，与仅依靠经典测量和协作运行的网络相比，全量子网络的精度可提高$\sqrt{N}$ 倍。

—

时钟之间的纠缠传播既可以通过直接交换飞行量子比特实现，也可以借助量子中继器实现。虽然纠缠生成中的时序问题可以

通过精心设计同步算法加以解决，但量子存储器或许能提供更大的灵活性：它们可以存储量子态，直到时钟量子比特准备好进行后续处理；对于规模更大、结构更复杂的网络，这一点尤其重要。如果纠缠分发所生成的所有光子对都需要同时存储在一个存储器中，那么时钟所需的最佳模式数随 $[\log(n)]^2$ [56], 增长，这要求每个包含 $n = 10^4$个量子比特的信道和时钟具备 85 个模式的容量。对于当前的量子存储器而言，这完全可以实现[57–59]。

为了提供全局时间基准，规模足够大的时钟网络必然需要在太空中运行，因为如前所述，仅依赖地面的光链路会产生损耗。

E. 分布式量子传感

与上述量子协同时钟网络类似，分布式量子传感器网络可以利用相同的基本原理，实现分布式传感；对于完全由量子方式运行的网络，噪声按 $1/\mathrm{N}$ 缩放，而对于完全由经典方式运行的网络，噪声按 $1/\sqrt{\mathrm{N}}$ 缩放，从而带来 $\sqrt{\mathrm{N}}$ 的提升。因此，规模足够大的网络或可实现低于标准量子极限 [60–62] 的高灵敏度测量，并能够探测引力效应，进而有可能将时空与量子物理联系起来 [53]。

分布式量子传感器的一项具体提案，是将其用于天文学，以构建干涉望远镜 [63] 或光学波长望远镜阵列 [64, 65]。静止的受地球束缚量子存储器很可能是首批可实现的硬件，也是支持任何量子传感器网络所必需的。与量子通信网络中所设想的一样，向太空量子传感器和存储器阵列发展的进程，将为天文学和大地测量学带来类似的益处。近期，通过探测并定位地震事件 [66]，人们已证明量子网络可用于大地测量。

III. 量子存储器类型

为实现第 II节中讨论的实验，必须能够在灵活或预先设定的时长内可靠地存储光子（飞行量子比特）。量子存储器能够充当飞行量子比特与静止量子比特之间的接口。它们能够按需吸收并重新发射光子量子比特，也可以在系统设定的特定时间后进行吸收和重新发射。实现量子存储器的平台种类繁多（见图 5）。这些平台可分为

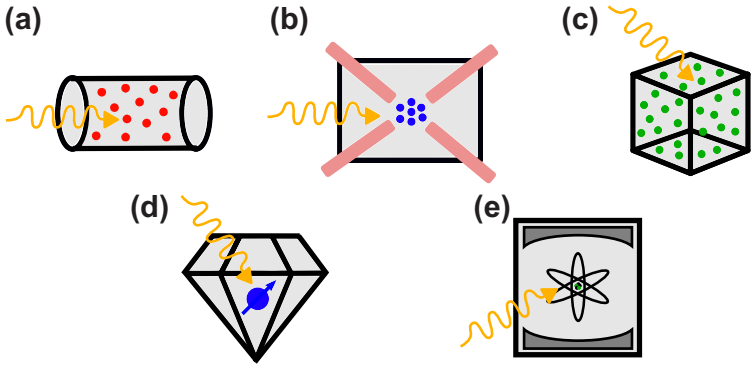


图 5. 可能的量子存储器平台。在基于系综的光子存储中，有 (a) 热蒸气池、(b) 磁光阱中的冷原子气体，以及 (c) 稀土离子掺杂晶体 (REIDs)。使用单发射体的典型实例包括 (d) 金刚石色心，或 (e) 腔中的单原子/离子。

基于系综的平台，例如冷原子气体和热原子气体，以及稀土离子掺杂晶体（REIDs）；还有单发射体，例如金刚石中的氮空位（NV）中心，或单原子和分子。光学活性系统是理想的候选者，因为光子量子态分发技术已相当成熟。因此，我们将重点讨论这些平台，不讨论目前缺乏光学接口的平台，尽管其中一些平台具有出色的相干时间和保真度 [67]。

针对不同平台，有多种实现量子存储的协议。它们可分为光学控制型协议，例如电磁感应透明（EIT）[68], 拉曼型方案 [69], 快速阶梯存储（FLAME） [70], 以及非共振级联吸收存储（ORCA） [71], ；另一类是工程化吸收方案，包括梯度回波存储（GEM） [72], 受控可逆非均匀展宽（CRIB） [73], 和原子频率梳（AFC） [74–76] 协议。每个平台通常支持不止一种协议。选择合适的协议在很大程度上取决于预期的存储应用。迄今为止，还没有任何一种组合能够充分满足通用设备的需求；换言之，各项指标之间存在取舍，例如高效率、长存储时间、时间与空间多模容量、大带宽和高保真度等。在考虑存储效率时，不仅要关注存储器固有指标，也要特别注意整个实验装置的表现。归根结底，必须根据目标应用权衡这些取舍。举例来说，在存储时间已预先确定的情形下，按需读出可能并非必要，

例如在基线（近似）恒定的贝尔检验中。这可以降低对存储协议的要求，进而减少系统复杂度；例如，如果光学相干时间已经足够，就可以避免在稀土离子掺杂晶体中进行长时间自旋波存储。

以下小节将更详细地介绍一些最相关的平台，并提及具有代表性的先进实现。有些实验存储的是含有大量光子的强激光脉冲，而非在单光子水平上运行。不过，大多数应用场景都离不开真正的单光子。因此，存储器需要与单光子源配对，这给存储器平台带来了额外的挑战 [77], ，也给开发与存储器相匹配的高效光子源带来了挑战 [78] 。

A. 热蒸气池

蒸气池是复杂度较低的系统，可在较宽的温度和条件范围内运行，无需低温制冷或强磁场，因此很容易扩展。常用的是碱金属原子，因为它们具有能量较低的自旋态和较长的相干时间。这些量子态在电磁感应透明和拉曼协议中充当存储态[77]。即使在室温下，原子蒸气也具有较高的光学深度，因此能够实现较高的存储效率。不过，已知这类存储器容易受到噪声影响，尤其是四波混频引起的噪声 [79]。

通过利用铯原子的自旋取向自由度和一种特殊的腔室涂层，Katz和Firstenberg [80] 报告称，存储时间最长达150毫秒时，存储效率为9–14%。通过采用特定的、为期一周的温度循环来抑制自旋破坏，他们将存储时间延长至430毫秒，并声称该存储器足以存储弱相干态和压缩态。借助超精细流形，他们提出了实现单光子操作的可能性。Guo等人 [81] 通过在铷存储器中采用失谐拉曼方案，实现了热蒸气存储器迄今最高的效率，达到82%。他们还在单光子水平上实现了高达98%的保真度。着眼于存储器与单光子源的接口， [82] 实现了一种接收带宽为0.66 GHz的存储器，适用于半导体量子点发出的光子。在原子蒸气中实现低噪声水平方面， [83], 报告的噪声光子数值为 $\mu_1 = 0.20$ ， 但

没有采用 [84]中所用的腔工程方案。在 [85] 报告的噪声水平低于$\mu_1 = 0.04$ 。

上述所有结果都是以牺牲其他存储器参数为代价实现的。在 [86] 中，对两个相关参数——端到端效率和单光子水平下的信噪比——进行了同步优化。 [87] 首次展示了利用来自自发参量下转换光源的光子，在基态暖原子蒸气存储器中实现真正的单光子存储与读出。

在这些系统中，可以通过空间复用实现多模容量，但代价是需要更强的激光器 [88], ；然而，据我们所知，这一方案尚未在实验中实现。微加工技术使单元尺寸缩小至毫米级，这有助于实现小型化和卫星集成 [89]。

B. 冷原子气体

与蒸气池不同，冷原子气体在磁光阱中冷却，以将原子运动降至 100 μK 或以下，从而为获得较长的相干时间提供了途径。要在更低温度下形成玻色-爱因斯坦凝聚体，则需要使用更强的激光器来形成更深的阱，或使用原子芯片进行射频蒸发冷却。原子芯片组件有助于实现小型化[90] 和操控，但需要更周密地规划真空馈通件，以及原子云与芯片表面之间的相互作用。

冷原子气体通常采用与热原子气体相同的存储协议。研究已实现较高的效率和较长的存储时间；具体而言， [91] 报告称，在铷气体中，存储时间为 220 毫秒时，本征读出率达到 76%。在 [36] ，存储效率达到 73%，但存储时间较短，仅为 3.2 毫秒。通过轨道角动量[92] 或空间复用 [58], 已实现多模能力，而且近期已展示了两个铷存储器之间的纠缠 [93]。

便携式冷原子气体装置已经问世[10, 94, 95] ，而片上光学器件未来或可减少对体积较大的光学组件的需求 [96]。然而，光子吸收率的上限限制了在厘米尺度上合理制备 BEC 所需的最小系统尺寸。对于航天应用而言，采用微加工磁光阱、可实现超高真空运行达 1000 天的被动抽气系统的小型化进展尤为值得关注 [97]。

以往 MAIUS 任务的技术积累 [10] 和 CAL [9] 使冷原子气体成为空间量子存储器的重要竞争者，而 BECCAL 项目 [11] 将成为未来的基石。

C. 稀土离子掺杂晶体（REID）

基于固态的系统具有低复杂度、紧凑以及易于微集成等固有优势。在稀土离子掺杂晶体中，低至单光子水平的光学模式被存储在晶体中掺杂的稀土离子的集体激发中；晶体通常冷却至低于 6 K 的温度。常见的掺杂离子包括嵌入正硅酸钇基质（Y_2SiO_5）中的镨（$^{141}Pr^{3+}$）或铕（$^{151/153}Eu^{3+}$），此外也有各种其他材料[98–100], , 其中甚至包括兼容电信波长的材料 [101, 102]。

光学相干时间可接近 100 µs [100, 102–104], , 在某些情况下甚至可达数百 µs [98, 105, 106]。为实现最长的相干时间，可将光学激发转换为自旋波，再利用动态解耦技术抑制其退相干 [107]。基于铕（^{151}Eu）施主离子的系统还可在约 1 特斯拉处的磁场不敏感跃迁上运行，从而实现长达六小时的自旋相干时间 [38]，以及长达一小时的光存储 [39]。在存储时间约为 12 µs 的情况下，单光子操作已实现，光子噪声水平分别达到 $\mu_1 = 0.069(2)$ [108] 和 $\mu_1 = 0.10(2)$ [37]。

大多数稀土离子掺杂晶体存储器采用混合型原子频率梳存储器的工作方式，将频率梳存储在自旋波中，以便按需读取，不过也存在电磁诱导透明存储器 [109, 110]。可以通过下转换来匹配电信波长 [57, 111]，这一方法最近用于两个稀土离子掺杂晶体存储器之间的多模操作 [112]，或用于与冷原子气体进行接口连接 [113]。

考虑太空飞行中的系统小型化时，可以通过在较小但足够的偏置磁场 [107, 114] 下运行，避免使用笨重的磁体。晶体也可以通过光波导 [115] 集成。近期单光子探测器用紧凑型低温冷却器的进展，也有助于满足基于固态系统的冷却需求 [116]。

D. 金刚石中的色心

固态量子存储器的其他有力候选者包括金刚石或碳化硅中的各种色心 [117]。研究较为深入的是金刚石中的氮空位（NV）色心：块体金刚石的碳晶格内，空位旁的替位氮原子会产生磁场可调荧光。除了可用作灵敏的磁力计外，这种色心还可广泛利用相关自由电子自旋、氮原子以及任何邻近 ^{13}C 原子的量子特性。最近，研究人员利用这些原子核构建了一个十量子比特存储寄存器，其相干时间对于任意单量子比特态为 75 秒，对于双量子比特纠缠则超过 10 秒 [118]。提升存储时间的技术包括通过 ^{13}C 原子核进行纠缠蒸馏 [119], 、对金刚石进行同位素纯化以尽量减少非均匀展宽 [120], 以及应变工程 [121]。

虽然氮空位目前是最成熟的系统，但近年来锡空位（SnV） [122] 或硅空位中心（SiV） [123] 也已成为补充选择。由于具有反演对称性，它们与光子纳米结构的兼容性更好，从而实现了较高的收集效率 [124]。与硅空位中心需要低温才能获得较长相干时间相比，锡空位在高于 1 K 的温度下或许也能提供相当甚至更好的相干性。

色心大多使用共聚焦显微镜进行读出，这会显著增加系统尺寸。因此，光学腔 [124], 、光子芯片 [125–127] 或光电读出 [128] 等发展有助于缩小系统尺寸。此外，色心也是出色的单光子发射器 [129], ，因此能够为集成系统提供原生光源。

吸收式存储方案的效率较低，这可能使空位色心作为发射式量子存储器更具吸引力；这类存储器可用于贝尔检验（第 IIA 节）或分布式时钟和传感器（第 IID 节和 IIE 节）。

E. 单原子与离子

高精细度腔中的单原子和离子是最早被研究的量子存储器候选方案之一 [3, 130, 131]。它们具有出色的相干特性，并结合了高效的光学接口。纠缠交换等任务已得到演示 [132]。借助高精细度腔，普塞尔效应可以增强光学相互作用，甚至实现强

可实现与腔模的耦合 [133–136]。

作为存储器，单离子的效率可达约 70 %，但受 [137], 离子的能级结构限制。囚禁的镱离子与发射到谐振腔模中的光子之间实现了保真度为 90.1(17) % 的确定性纠缠 [138]。基于单原子的存储器实现了 22 % 的效率和 100 ms 的存储时间 [139]。此外，单原子支持预告式存储 [140]；与邻近粒子耦合时 [141, 142]，还可实现基本的量子信息处理，这对量子纠错很有用。

然而，实验复杂度较高，而且多模容量有限，这对需要多模存储器的应用（例如纠缠分发）构成了严格限制。

F. 太空量子存储器的工程挑战

我们的讨论凸显了将量子存储器搭载于太空平台的特殊意义。由于太空研究和技术开发始终受到尺寸、质量和功耗方面的限制，将量子技术集成到立方体卫星 [31, 143] 或卫星 [144]中是自然的发展方向。这也意味着必须满足严苛的环境要求，例如执行月球任务或更远距离任务时所需的要求[8, 145]。

由于远距离传输单光子以执行量子测量是一项主要挑战，通过 Alphasat I-XL [146] 验证从地球静止轨道（GEO）到地面的量子极限信号传输可行性，是一项重要里程碑。这表明，位于地球静止轨道的存储器或作为中继站的存储器，是跨越远距离的可行且必要的选择。对高损耗信道中的贝尔检验开展的成功可行性研究，也为基于太空的基础科学描绘了积极前景 [16]。

在太空部署光学硬件时，必然需要考虑对准以及各类组件的稳健性挑战，例如高数值孔径透镜等。现有技术中已有解决方案，例如激光通信终端 [146,149, 150] 和光学钟 [151, 152]。

谈到太空任务中量子存储平台的优先选择，需要考虑多种因素：中期来看，热蒸气池和冷原子气体凭借已有的飞行应用经验以及相对简单的外围设备，在小型化方面展现出最先进的能力。它们较高的光学效率和带宽目前也使其占据优势，但稀土离子掺杂晶体最终或许能提供更长的存储时间

表 I. 量子存储器及其主要性能指标示例。效率通常指存储器本身的效率。“存储与读取”表示是否支持光子存储和/或读取。

平台	机制	（存储）与（读取）	带宽	效率	存储 **Time**
热蒸气池					
^{87}铷 [81]	拉曼	存储与读取	77 兆赫	82.0%	170 纳秒
^{87}Rb [82]	EIT	存储与读取	660 兆赫	17%	50 纳秒
冷原子气体					
^{87}Rb [36]	EIT	R	-	73%	3.2 毫秒
^{87}Rb [91]	EIT	R	-	76%	220 毫秒
稀土离子掺杂晶体					
$^{151}Eu^{3+}:Y_2SiO_5$ [114]	混合原子频率梳	存储与读取	1.5 兆赫	7.4%	20 毫秒
$^{141}Pr^{3+}:Y_2SiO_5$ [147]	混合原子频率梳	存储与读取	< 2兆赫	5%	13 μ秒
金刚石色心					
氮空位 [148]	吸收	S	12 兆赫	1%	> 10 秒
硅空位中心 [124]	色散	S	≈50 兆赫	-	0.2 毫秒
单原子和离子					
^{87}Rb [139]	拉曼	R	-	22%	100 毫秒
^{171}镱$^{+}$ [138]	拉曼	R	19.4 兆赫	10.1%	1.022 毫秒

色心也是如此。卫星用的紧凑型低温冷却器很容易获得，在 35 K 下可提供超过 100 mW 的冷却功率。对于典型工作温度要求为 6 K 及以下的固态量子存储器而言，冷却功率以及相关的尺寸、重量和功耗预算都需要投入更多工程工作。此外，光学组件受到的振动影响是一个主要问题，尤其是在占地较小的卫星上，压缩机难以与冷级在空间上分离。尽管如此，基于固态的系统正快速发展，中期内很可能先在地面应用；待低温技术更加紧凑或实现更高温度运行后，它们将更适合长期的太空任务。此外，潜在的光子集成也使其成为长期发展的优秀候选方案，在系统尺寸和存储效率方面均有优势。

最后，表 I 中列举的关键性能因素，必须结合拟开展的具体实验加以考量。该条目列表并非详尽无遗，但旨在概述本文所讨论应用的代表性情况。它强调了针对明确的应用需求进行优化时需要权衡的各种因素。

IV. 结论

星载量子存储器在推动基础物理学实验方面潜力巨大 [7, 8, 19, 30, 31]。一旦实现远距离贝尔检验，存储器辅助实验将成为开展更复杂测量的绝佳平台，用于研究共享纠缠的运动观察者之间局域量子系统的相对论效应 [17], , 以及在时空引力场具有动力学特性的区域内开展实验 [40]。量子存储器不仅能够检验相对论与量子力学交汇领域的科学预测，还将为未来深空量子通信的技术发展提供支持 [8, 145]。

我们讨论了近期有关运动和动态引力场对局域系统量子态影响的预测所依据的思想，以及检验这些预测为何需要长时间存储量子态。量子存储器的存储时间和效率正接近适用于航天应用的水平，而多模能力目前正受到广泛研究。此外，量子技术和量子存储器领域正在开展的众多研究活动，令人对未来几年取得的进展充满乐观。

致谢

感谢 Luca Mazzarella 和 Albert Roura 就量子存储器有趣的航天应用进行了富有见地的讨论。

---

[1] N.Gisin 和 R.Thew，量子通信，《自然·光子学》**1**，165（2007）。[2] N. Sangouard、C. Simon、H. de Riedmatten 和 N. Gisin，基于原子系综和线性光学的量子中继器，《现代物理学评论》**83**，33（2011年）。

[3] H. J. Kimble，《量子互联网》，《自然》453，1023（2008）。[4]S. Wehner、D. Elkouss 和 R. Hanson，《量子互联网：未来发展蓝图》，《科学》362，eaam9288（2018）。[5]S. Pirandola 和 S. L. Braunstein，《物理学：携手构建量子互联网》，《自然》532，169（2016）。[6] C. L. Degen、F. Reinhard 和 P. Cappellaro，《量子传感》，《现代物理评论》89，035002（2017）。[7] A. Belenchia、M. Carlesso、Ömer Bayraktar、D. Dequal、I. Derkach、G. Gasbarri、W. Herr、Y. L. Li、M. Rademacher、J. Sidhu、D. K. Oi、S. T. Seidel、R. Kaltenbaek、C. Marquardt、H. Ulbricht、V. C. Usenko、L. Wörner、A. Xuereb、M. Paternostro 和 A. Bassi，《太空中的量子物理》，《物理报告》951，1（2022），太空中的量子物理。[8] M. Mohageg、L. Mazzarella、D. V. Strekalov、N. Yu、A. Zhai、S. Johnson、C. Anastopoulos、J. Gal- licchio、B. L. Hu、T. Jennewein、S.-Y. Lin、A. Ling、C. Marquardt、M. Meister、A. Roura、L. Wörner、W. P. Schleich、R. Newell、C. Schubert、G. Vallone、P. Villoresi 和 P. Kwiat，《深空量子链路：利用长基线量子光学开展基础物理实验的前景》，arXiv 预印本 10.48550/arXiv.2111.15591（2021）。[9] D. C. Aveline、J. R. Williams、E. R. Elliott、C. Dutenhoffer、J. R. Kellogg、J. M. Kohel、N. E. Lay、K. Oudrhiri、R. F. Shotwell、N. Yu 和 R. J. Thompson，《在绕地球轨道运行的研究实验室中观测到玻色–爱因斯坦凝聚体》，《自然》582，193（2020）。[10] D. Becker、M. D. Lachmann、S. T. Seidel、H. Ahlers、A. N. Dinkelaker、J. Grosse、O. Hellmig、H. Müntinga、V. Schkolnik、T. Wendrich、A. Wenzlawski、B. Weps、R. Corgier、T. Franz、N. Gaaloul、W. Herr、D. Lüdtke、M. Popp、S. Amri、H. Duncker、M. Erbe、A. Kohfeldt、A. Kubelka-Lange、C. Braxmaier、E. Charron、W. Ertmer、M. Krutzik、C. Lämmerzahl、A. Peters、W. P. Schleich、K. Sen- gstock、R. Walser、A. Wicht、P. Windpassinger 和 E. M. Rasel，《面向精密干涉测量的空间玻色–爱因斯坦凝聚》，《自然》562，391（2018）。[11] K. Frye、S. Abend、W. Bartosch、A. Bawamia、D. Becker、H. Blume、C. Braxmaier、S.-W. Chiow、M. A. Efremov、W. Ertmer、P. Fierlinger、T. Franz、N. Gaaloul、J. Grosse、C. Grzeschik、O. Hellmig、V. A. Henderson、W. Herr、U. Israelsson、J. Kohel、M. Krutzik、C. Kürbis、C. Läm- merzahl、M. List、D. Lüdtke、N. Lundblad、J. P. Marburger、M. Meister、M. Mihm、H. Müller、H. Müntinga、A. M. Nepal、T. Oberschulte、A. Papakonstantinou、J. Perovˇsek、A. Peters、A. Prat、E. M. Rasel、A. Roura、M. Sbroscia、W. P. Schleich、C. Schubert、S. T. Seidel、J. So mmer、C. Spin- deldreier、D. Stamper-Kurn、B. K. Stuhl、M. Warner、T. Wendrich、A. Wenzlawski、A. Wicht,

P. Windpassinger、N. Yu 和 L. Wörner, 《玻色-爱因斯坦凝聚态与冷原子实验室》, EPJ Quantum Technology 8, 1 (2021年)。[12] S. Pirandola、J. Eisert、C. Weedbrook、A. Furusawa 和 S. L. Braunstein, 《量子隐形传态的进展》, 《自然·光子学》9, 641 (2015年)。[13] Ursin, R.、Jennewein, T.、Kofler, J.、Perdigues, J. M.、Cacciapuoti, L.、de Matos, C. J.、Aspelmeyer, M.、Valencia, A.、Scheidl, T.、Acin, A.、Barbieri, C.、Bianco, G.、Brukner, C.、Capmany, J.、Cova, S.、Giggenbach, D.、Leeb, W.、Hadfield, R. H.、Laflamme, R.、Lütkenhaus, N.、Milburn, G.、Peev, M.、Ralph, T.、Rarity, J.、Renner, R.、Samain, E.、Solomos, N.、Tittel, W.、Torres, J. P.、Toyoshima, M.、Ortigosa-Blanch, A.、Pruneri, V.、Villoresi, P.、Walmsley, I.、Weihs, G.、Weinfurter, H.、Zukowski, M. 和 Zeilinger, A., 《Space-quest：太空量子纠缠实验》, Europhysics News 40, 26 (2009年)。[14] J.-G. Ren、P. Xu、H.-L. Yong、L. Zhang、S.-K. Liao、J. Yin、W.-Y. Liu、W.-Q. Cai、M. Yang、L. Li、K.-X. Yang、X. Han、Y.-Q. Yao、J. Li、H.-Y. Wu、S. Wan、L. Liu、D.-Q. Liu、Y.-W. Kuang、Z.-P. He、P. Shang、C. Guo、R.-H. Zheng、K. Tian、Z.-C. Zhu、N.-L. Liu、C.-Y. Lu、R. Shu、Y.-A. Chen、C.-Z. Peng、J.-Y. Wang 和 J.-W. Pan, 《地面到卫星的量子隐形传态》, 《自然》549, 70 (2017年)。[15] S.-Y. Lin 和 B.-L. Hu, 《在外太空进行长基线量子隐形传态与纠缠交换》, Classical Quant Grav 38, 165002 (2021年)。[16] Y. Cao、Y.-H. Li、W.-J. Zou、Z.-P. Li、Q. Shen、S.-K. Liao、J.-G. Ren、J. Yin、Y.-A. Chen、C.-Z. Peng 和 J.-W. Pan, 《极高损耗信道上的贝尔检验：迈向地球与月球之间纠缠光子对的分发》, Physical Review Letters 120, 140405 (2018年)。[17] D. E. Bruschi、C. Sabín、A. White、V. Baccetti、D. K. Oi 和 I. Fuentes, 《在基于太空的实验中检验引力和运动对量子纠缠的影响》, New Journal of Physics 16, 053041 (2014年)。[18] D. E. Bruschi、T. C. Ralph、I. Fuentes、T. Jennewein 和 M. Razavi, 《时空对基于卫星的量子通信的影响》, Phys Rev D 90, 045041 (2014年)。[19] S. K. Joshi、J. Pienaar、T. C. Ralph、L. Cacciapuoti、W. McCutcheon、J. Rarity、D. Giggenbach、J. G. Lim、V. Makarov、I. Fuentes、T. Scheidl、E. Beckert、M. Bourennane、D. E. Bruschi、A. Ca-bello、J. Capmany、A. Carrasco-Casado、E. Diamanti、M. Dušek、D. Elser、A. Gulinatti、R. H. Had-field、T. Jennewein、R. Kaltenbaek、M. A. Krainak、H.-K. Lo、C. Marquardt、G. Milburn、M. Peev、A. Poppe、V. Pruneri、R. Renner、C. Salomon、J. Skaar、N. Solomos、M. Stipˇcevi´c、J. P. Torres、M. Toyoshima、P. Villoresi、I. Walmsley、G. Weihs、H. Weinfurter、A. Zeilinger、M. Zukowski 和 R. U. and, 《Space quest任务提案：实验检验引力导致的退相干》,

New Journal of Physics 20, 063016 (2018年)。[20] D. E. Bruschi、S. Chatzinotas、F. K. Wilhelm 和 A. W. Schell, 《时空对相干光波包的影响》, Phys Rev D 104, 085015 (2021年)。[21] D. E. Bruschi 和 A. W. Schell, 《引力红移引发量子干涉》, arXiv预印本 10.48550/arXiv.2109.00728 (2021年)。[22] G. Vallone、D. G. Marangon、M. Canale、I. Savorgnan、D. Bacco、M. Barbieri、S. Calimani、C. Bar-bieri、N. Laurenti 和 P. Villoresi, 《在有损耗和湍流的自由空间信道中采用自适应实时选择进行量子密钥分发》, Phys Rev A 91, 042320 (2015年)。[23] A. Scriminich、G. Foletto、F. Picciariello、A. Stanco、G. Vallone、P. Villoresi 和 F. Vedovato, 《自由空间量子密钥分发系统的最优设计与性能评估》, arXiv预印本 10.48550/arXiv.2109.13886 (2021年)。[24] J. S. Sidhu、S. K. Joshi、M. Gündo˘gan、T. Brougham、D. Lowndes、L. Mazzarella、M. Krutzik、S. Mohapatra、D. Dequal、G. Vallone、P. Villoresi、A. Ling、T. Jennewein、M. Mohageg、J. G. Rarity、I. Fuentes、S. Pirandola 和 D. K. L. Oi, 《空间量子通信的进展》, IET Quantum Communication 2, 182 (2021年)。[25] M. D. Lachmann、H. Ahlers、D. Becker、A. N. Dinkelaker、J. Grosse、O. Hellmig、H. Müntinga、V. Schkolnik、S. T. Seidel、T. Wendrich、A. Wenzlawski、B. Carrick、N. Gaaloul、D. Lüdtke、C. Brax-maier、W. Ertmer、M. Krutzik、C. Lämmerzahl、A. Peters、W. P. Schleich、K. Sengstock、A. Wicht、P. Windpassinger 和 E. M. Rasel, 《太空超冷原子干涉测量》, Nature Communications 12, 10.1038/s41467-021-21628-z (2021年)。[26] S. Muralidharan、L. Li、J. Kim、N. Lütkenhaus、M. D. Lukin 和 L. Jiang, 《远距离量子通信的最优架构》, Scientific Reports 6, 10.1038/srep20463 (2016年)。[27] J. Yin、Y. Cao、Y.-H. Li、S.-K. Liao、L. Zhang、J.-G. Ren、W.-Q. Cai、W.-Y. Liu、B. Li、H. Dai、G.-B. Li、Q.-M. Lu、Y.-H. Gong、Y. Xu、S.-L. Li、F.-Z. Li、Y.-Y. Yin、Z.-Q. Jiang、M. Li、J.-J. Jia、G. Ren、D. He、Y.-L. Zhou、X.-X. Zhang、N. Wang、X. Chang、Z.-C. Zhu、N.-L. Liu、Y.-A. Chen、C.-Y. Lu、R. Shu、C.-Z. Peng、J.-Y. Wang 和 J.-W. Pan, 《跨越1200公里的基于卫星的纠缠分发》, 《科学》356, 1140 (2017年)。[28]M. Gündo˘gan、J. S. Sidhu、V. Henderson、L. Mazzarella、J. Wolters、D. K. L. Oi 和 M. Krutzik, 《面向全球量子网络的星载量子存储器提案》, npj Quantum Inf 7, 128 (2021年)。

[29] J. Wallnöfer、F. Hahn、M. Gündoˇgan、J. S. Sidhu、F. Krüger、N. Walk、J. Eisert 和 J. Wolters，《模拟面向多颗卫星的量子中继策略》，arXiv 预印本 10.48550/arXiv.2110.15806（2021年）。[30]P. Magnani、M. Schiavon、A. R. H. Smith、D. R. Terno、G. Vallone、F. Vedovato、P. Villoresi 和 S. Vinjanampathy，《量子卫星与相对论检验》，arXiv 预印本 10.48550/arXiv.1906.04415（2019年）。[31] A. Villar、A. Lohrmann、X. Bai、T. Vergoossen、R. Bedington、C. Perumangatt、H. Y. Lim、T. Islam、A. Reezwana、Z. Tang、R. Chandrasekara、S. Sachidananda、K. Durak、C. F. Wildfeuer、D. Griffin、D. K. L. Oi 和 A. Ling，《纳米卫星上的纠缠演示》，Optica 7，734（2020年）。[32] B. Hensen、H. Bernien、A. E. Dréau、A. Reiserer、N. Kalb、M. S. Blok、J. Ruitenberg、R. F. L. Vermeulen、R. N. Schouten、C. Abellán、W. Amaya、V. Pruneri、M. W. Mitchell、M. Markham、D. J. Twitchen、D. Elkouss、S. Wehner、T. H. Taminiau 和 R. Hanson，《利用相隔1.3公里的电子自旋实现无漏洞的贝尔不等式违背》，《自然》526，682（2015年）。[33]M. Giustina、M. A. Versteegh、S. Wengerowsky、J. Handsteiner、A. Hochrainer、K. Phe- lan、F. Steinlechner、J. Kofler、J.-Å. Larsson、C. Abellán、W. Amaya、V. Pruneri、M. W. Mitchell、J. Beyer、T. Gerrits、A. E. Lita、L. K. Shalm、S. W. Nam、T. Scheidl、R. Ursin、B. Wittmann 和 A. Zeilinger，《利用纠缠光子对贝尔定理进行显著的无漏洞检验》，Physical Review Letters 115，250401（2015年）。[34] T. Scheidl、R. Ursin、J. Kofler、S. Ramelow、X.-S. Ma、T. Herbst、L. Ratschbacher、A. Fedrizzi、N. K. Langford、T. Jennewein 和 A. Zeilinger，《在选择自由条件下违背局域实在论》，Proc Natl Acad Sci 107，19708（2010年）。[35] L. K. Shalm、E. Meyer-Scott、B. G. Christensen、P. Bierhorst、M. A. Wayne、M. J. Stevens、T. Gerrits、S. Glancy、D. R. Hamel、M. S. Allman、K. J. Coakley、S. D. Dyer、C. Hodge、A. E. Lita、V. B. Verma、C. Lambrocco、E. Tortorici、A. L. Migdall、Y. Zhang、D. R. Kumor、W. H. Farr、F. Marsili、M. D. Shaw、J. A. Stern、C. Abellán、W. Amaya、V. Pruneri、T. Jennewein、M. W. Mitchell、P. G. Kwiat、J. C. Bienfang、R. P. Mirin、E. Knill 和 S. W. Nam，《对局域实在论进行有力的无漏洞检验》，Physical Review Letters 115，250402（2015年）。[36] X.-H. Bao、A. Reingruber、P. Dietrich、J. Rui、A. Dück、T. Strassel、L. Li、N.-L. Liu、B. Zhao 和 J.-W. Pan，《环形腔内冷原子实现高效、长寿命量子存储器》，Nat Phys 8，517（2012年）。

[37]P. Jobez、C. Laplane、N. Timoney、N. Gisin、A. Ferrier、P. Goldner 和 M. Afzelius，《系综型光学存储器中的量子水平相干自旋控制》，Physical Review Letters 114，230502（2015年）。[38] M. Zhong、M. P. Hedges、R. L. Ahlefeldt、J. G. Bartholomew、S. E. Beavan、S. M. Wittig、J. J. Longdell 和 M. J. Sellars，《固体中具有六小时相干时间的可光学寻址核自旋》，《自然》517，177（2015年）。[39] Y. Ma、Y.-Z. Ma、Z.-Q. Zhou、C.-F. Li 和 G.-C. Guo，《原子频率梳存储器实现一小时相干光存储》，《自然·通讯》12，1（2021年）。[40] C. Sabín、D. E. Bruschi、M. Ahmadi 和 I. Fuentes，《引力波引发的声子产生》，新物理学杂志 16，085003（2014年）。[41] V. Giovannetti、S. Lloyd 和 L. Maccone，《量子计量学》，Physical Review Letters 96，010401（2006年）。[42] C. R. Rao，《统计参数估计中的信息与可达到的精度》，载于《统计学突破：基础与基本理论》，S. Kotz 和 N. L. Johnson 编（施普林格纽约，纽约州纽约市，1992年），第235–247页。[43] S. L. Braunstein 和 C. M. Caves，《统计距离与量子态几何》，Physical Review Letters 72，3439（1994年）。[44] V. V. Dodonov，《动态卡西米尔效应的现状》，Phys Scripta 82，038105（2010年）。[45] D. E. Bruschi、I. Fuentes 和 J. Louko，《前往半人马座α星：运动导致的腔模纠缠退化》，Phys Rev D 85，061701（2012年）。[46] N. Friis、A. R. Lee、D. E. Bruschi 和 J. Louko，《费米子腔模的运动学纠缠退化》，Phys Rev D 85，025012（2012年）。[47]N. Friis、D. E. Bruschi、J. Louko 和 I. Fuentes，《运动产生纠缠》，Phys Rev D 85，081701（2012年）。[48] D. E. Bruschi、A. Dragan、A. R. Lee、I. Fuentes 和 J. Louko，《相对论运动产生量子门和纠缠共振》，Physical Review Letters 111，090504（2013年）。[49] N. Friis、M. Huber、I. Fuentes 和 D. E. Bruschi，《非均匀腔运动实现的量子门和多体纠缠共振》，Phys Rev D 86，105003（2012年）。[50] D. E. Bruschi、J. Louko、D. Faccio 和 I. Fuentes，《周期性加速腔中的模式混合量子门与无粒子产生的纠缠》，新物理学杂志 15，073052（2013年）。[51] D. Rätzel、F. Schneiter、D. Braun、T. Bravo、R. Howl、M. P. E. Lock 和 I. Fuentes，《弯曲时空中光学谐振腔的频谱》，新物理学杂志 20，053046（2018年）。

[52] T. Bravo、D. Rätzel 和 I. Fuentes，扩展量子系统中的引力时间膨胀：以 光钟为例，位于

(2022).[53] D. Rideout, T. Jennewein, G. Amelino-Camelia, T. F. Demarie, B. L. Higgins, A. Kempf, A. Kent, R. Laflamme, X. Ma, R. B. Mann, E. Martín-Martínez, N. C. Menicucci, J. Moffat, C. Simon, R. Sorkin, L. Smolin, and D. R. Terno, 《可借助卫星实现的基础量子光学实验——抵达相对论距离与速度》, Classical Quant Grav 29, 224011 (2012).[54] B. Guinot and E. F. Arias, 《从1955年至今的原子计时》, Metrologia 42, S20 (2005).[55] C. W. Chou, D. B. Hume, T. Rosenband, and D. J. Wineland, 《光学钟与相对论》, 《科学》329, 1630 (2010).[56] P. Komar, E. M. Kessler, M. Bishof, L. Jiang, A. S. Sørensen, J. Ye, and M. D. Lukin, 《时钟量子网络》, Nat Phys 10, 582 (2014).[57]A. Seri, D. Lago-Rivera, A. Lenhard, G. Corrielli, R. Osellame, M. Mazzera, and H. de Riedmatten, 《频分复用预示单光子的量子存储》, Physical Review Letters 123, 080502 (2019).[58] Y. F. Pu, N. Jiang, W. Chang, H. X. Yang, C. Li, and L. M. Duan, 《实现具有225个可独立访问存储单元的复用量子存储器》, 《自然·通讯》8, 1 (2017).[59] M. Lipka, M. Mazelanik, A. Leszczy´nski, W. Wasilewski, and M. Parniak, 《利用量子存储器大规模复用产生贝尔型纠缠》, Communications Physics 4, 10.1038/s42005-021-00551-1 (2021).[60] Z. Zhang and Q. Zhuang, 《分布式量子传感》, Quantum Sci Technol 6, 043001 (2021).[61] Q. Zhuang, Z. Zhang, and J. H. Shapiro, 《利用连续变量多体纠缠进行分布式量子传感》, Phys Rev A 97, 032329 (2018).[62] X. Guo, C. R. Breum, J. Borregaard, S. Izumi, M. V. Larsen, T. Gehring, M. Christandl, J. S. Neergaard-Nielsen, and U. L. Andersen, 《连续变量纠缠网络中的分布式量子传感》, Nat Phys 16, 281 (2020).[63] D. Gottesman, T. Jennewein, and S. Croke, 《利用量子中继器构建更长基线望远镜》, Physical Review Letters 109, 070503 (2012).[64] E. Khabiboulline, J. Borregaard, K. D. Greve, and M. Lukin, 《量子网络中的光学干涉测量》, Physical Review Letters 123, 070504 (2019).[65] E. T. Khabiboulline, J. Borregaard, K. D. Greve, and M. D. Lukin, 《量子辅助望远镜阵列》, Phys Rev A 100, 022316 (2019).

[66] J.-P. Chen, C. Zhang, Y. Liu, C. Jiang, D.-F. Zhao, W.-J. Zhang, F.-X. Chen, H. Li, L.-X. You, Z. Wang, Y. Chen, X.-B. Wang, Q. Zhang, and J.-W. Pan, 《利用分布式振动传感实现658千米光纤量子密钥分发》, Physical Review Letters 128, 180502 (2022).[67] M. Steger, K. Saeedi, M. L. W. Thewalt, J. J. L. Morton, H. Riemann, N. V. Abrosimov, P. Becker, and H.-J. Pohl, 《利用施主自旋实现超过180 秒的量子信息存储》 ²⁸si “半导体真空”, 《科学》336, 1280 (2012).[68] D. F. Phillips, A. Fleischhauer, A. Mair, R. L. Walsworth, and M. D. Lukin, 《原子蒸气中的光存储》, Physical Review Letters 86, 783 (2001).[69] K. Reim, J. Nunn, V. Lorenz, B. Sussman, K. Lee, N. Langford, D. Jaksch, and I. Walmsley, 《迈向高速光学量子存储器》, 《自然·光子学》4, 218 (2010).[70] R. Finkelstein, E. Poem, O. Michel, O. Lahad, and O. Firstenberg, 《室温下用于光子同步的快速无噪声存储器》, 《科学进展》4, eaap8598 (2018).[71] K. T. Kaczmarek, P. M. Ledingham, B. Brecht, S. E. Thomas, G. S. Thekkadath, O. Lazo-Arjona, J. H. D. Munns, E. Poem, A. Feizpour, D. J. Saunders, J. Nunn, and I. A. Walmsley, 《高速无噪声光学量子存储器》, Phys Rev A 97, 042316 (2018).[72] M. Hosseini, B. M. Sparkes, G. Campbell, P. K. Lam, and B. C. Buchler, 《温热铷蒸气中的高效率相干光学存储器》, 《自然·通讯》2, 174 (2011).[73]B. Kraus, W. Tittel, N. Gisin, M. Nilsson, S. Kröll, and J. I. Cirac, 《基于受控可逆非均匀展宽的非定常光场量子存储器》, Phys Rev A 73, 020302 (2006).[74] M. Afzelius, C. Simon, H. de Riedmatten, and N. Gisin, 《基于原子频率梳的多模量子存储器》, Phys Rev A 79, 052329 (2009).[75] M. Afzelius, I. Usmani, A. Amari, B. Lauritzen, A. Walther, C. Simon, N. Sangouard, J. Minář, H. de Riedmatten, N. Gisin, and S. Kröll, 《展示具有自旋波存储功能的光原子频率梳存储器》, Physical Review Letters 104, 040503 (2010).[76] D. Main, T. M. Hird, S. Gao, I. A. Walmsley, and P. M. Ledingham, 《室温下的光原子频率梳存储》, 《光学快报》46, 2960 (2021).[77] K. Heshami, D. G. England, P. C. Humphreys, P. J. Bustard, V. M. Acosta, J. Nunn, and B. J. Suss- man, 《量子存储器：新兴应用与近期进展》, 《现代光学杂志》63, 2005 (2016).[78] R. Mottola, G. Buser, C. Müller, T. Kroh, A. Ahlrichs, S. Ramelow, O. Benson, P. Treutlein, and J. Wolters, 《一种高效、可调谐且稳健的光子对光源，工作于铷-87 D1线,

光学快报 28 ，3159（2020年）

.[79]P. S. Michelberger、T. F. M. Champion、M. R. Sprague、K. T. Kaczmarek、M. Barbieri、X. M. Jin、D. G. England、W. S. Kolthammer、D. J. Saunders、J. Nunn 和 I. A. Walms- ley，《将吉赫兹带宽预示单光子与暖蒸气拉曼存储器连接》，New Journal of Physics 17，043006（2015年）。[80] O. Katz 和 O. Firstenberg，《在室温碱金属蒸气中实现一秒光存储》，《自然·通讯》9，2074（2018年）。[81] J. Guo、X. Feng、P. Yang、Z. Yu、L. Chen、C.-H. Yuan 和 W. Zhang，《室温原子中采用最优控制的高性能拉曼量子存储器》，《自然·通讯》10，1（2019年）。[82] J. Wolters、G. Buser、A. Horsley、L. Béguin、A. Jöckel、J.-P. Jahn、R. J. Warburton 和 P. Treut- lein，《适用于半导体量子点单光子的简易原子量子存储器》，Physical Review Letters 119，060502（2017年）。[83] S. E. Thomas、T. M. Hird、J. H. Munns、B. Brecht、D. J. Saunders、J. Nunn、I. A. Walmsley 和 P. M. Ledingham，《内置四波混频噪声抑制功能的拉曼量子存储器》，Phys Rev A 100，033801（2019年）。[84]D. Saunders、J. Munns、T. Champion、C. Qiu、K. Kaczmarek、E. Poem、P. Ledingham、I. Walmsley 和 J. Nunn，《腔增强室温宽带拉曼存储器》，Physical Review Letters 116，090501（2016年）。[85] M. Namazi、C. Kupchak、B. Jordaan、R. Shahrokhshahi 和 E. Figueroa，《用于偏振量子比特的超低噪声室温量子存储器》，Phys Rev Appl 8，034023（2017年）。[86] L. Esguerra、L. Meßner、E. Robertson、N. V. Ewald、M. Gündo˘gan 和 J. Wolters，《铯D1线热蒸气电磁感应透明存储器的优化与读出噪声分析》，arXiv 预印本 10.48550/arXiv.2203.06151（2022年）。[87] G. Buser、R. Mottola、B. Cotting、J. Wolters 和 P. Treutlein，《基态蒸气池量子存储器中的单光子存储》，arXiv 预印本 10.48550/arXiv.2204.12389（2022年）。[88]L. Meßner、L. Esguerra、M. Gündo˘gan 和 J. Wolters，《用于暖铯蒸气多轨量子存储器的脉冲双程锥形放大器》，载于2021年欧洲激光与电光会议暨欧洲量子电子学会议

（CLEO/Europe

(2021年) 第 1–1 页。[89] J. Kitching，《芯片级原子器件》，《应用物理评论》**5**，031302（2018年）。

[90] M. Keil、O. Amit、S. Zhou、D. Groswasser、Y. Japha 和 R. Folman，《原子芯片上的冷物质十五年：前景、实现与展望》，《现代光学杂志》63，1840（2016年）。[91] S.-J. Yang、X.-J. Wang、X.-H. Bao 和 J.-W. Pan，《具有亚秒级寿命的高效量子光-物质接口》，《自然·光子学》10，381（2016年）。[92] D.-S. Ding、Z.-Y. Zhou、B.-S. Shi 和 G.-C. Guo，《基于冷原子系综的单光子级量子图像存储器》，《自然·通讯》4，1（2013年）。[93] Y. Yu、F. Ma、X.-Y. Luo、B. Jing、P.-F. Sun、R.-Z. Fang、C.-W. Yang、H. Liu、M.-Y. Zheng、X.-P. Xie、W.-J. Zhang、L.-X. You、Z. Wang、T.-Y. Chen、Q. Zhang、X.-H. Bao 和 J.-W. Pan，《通过光纤跨越数十公里实现两个量子存储器的纠缠》，《自然》578，240（2020年）。[94] E. A. Salim、J. DeNatale、D. M. Farkas、K. M. Hudek、S. E. McBride、J. Michalchuk、R. Mihailovich 和 D. Z. Anderson，《用于超冷原子实际应用的紧凑型微芯片系统》，《量子信息处理》10，975（2011年）。[95] D. M. Farkas、K. M. Hudek、E. A. Salim、S. R. Segal、M. B. Squires 和 D. Z. Anderson，《一种紧凑、可运输的微芯片系统，可高重复频率地产生玻色–爱因斯坦凝聚体》，《应用物理快报》96，093102（2010年）。[96] C. J. Straatsma、M. K. Ivory、J. Duggan、J. Ramirez-Serrano、D. Z. Anderson 和 E. A. Salim，《用于冷原子实验的片上光学晶格》，《光学快报》40，3368（2015年）。[97]J. Rushton、M. Aldous 和 M. Himsworth，《特邀综述：用于便携式超冷量子技术的全微型化磁光阱的可行性》，《科学仪器评论》85，121501（2014年）。[98]S. Welinski、A. Tiranov、M. Businger、A. Ferrier、M. Afzelius 和 P. Goldner，《通过大规模光学自旋极化延长稀土掺杂晶体中的相干时间》，Physical Review X 10，031060（2020年）。[99] R. Ahlefeldt、M. R. Hush 和 M. Sellars，《化学计量稀土晶体中的超窄光学非均匀线宽》，Physical Review Letters 117，250504（2016年）。[100] M. F. Askarani、A. Das、J. H. Davidson、G. C. Amaral、N. Sinclair、J. A. Slater、S. Marzban、C. W. Thiel、R. L. Cone、D. Oblak 和 W. Tittel，《用于高速率量子中继器的长寿命固态光存储器》，Physical Review Letters 127，220502（2021年）。[101]B. Lauritzen、J. Miná˘r、H. de Riedmatten、M. Afzelius、N. Sangouard、C. Simon 和 N. Gisin，《单光子水平的电信波长固态存储器》，Physical Review Letters 104，080502（2010年）。

[102] I. Craiciu、M. Lei、J. Rochman、J. M. Kindem、J. G. Bartholomew、E. Miyazono、T. Zhong、N. Sinclair 和 A. Faraon，《电信波段的纳米光子量子存储》，Phys Rev Appl 12, 024062（2019年）。[103]S. P. Horvath、M. K. Alqedra、A. Kinos、A. Walther、J. M. Dahlström、S. Kröll 和 L. Rippe，《无噪声按需原子频率梳量子存储器》，Physical Review Research 3, 023099（2021年）。[104] A. Ortu、A. Tiranov、S. Welinski、F. Fröwis、N. Gisin、A. Ferrier、P. Goldner 和 M. Afzelius，《固态电子自旋中光学和微波跃迁的同时相干性增强》，Nature Materials 17, 671（2018年）。[105] T. Böttger、C. W. Thiel、R. L. Cone 和 Y. Sun，《磁场取向对铒中光学退相干的影响$^{3+}$：Y_2SiO_5磁场取向对铒中光学退相干的影响$^{3+}$：Y_2SiO_5,》，Physical Review B 79, 115104（2009年）。[106] H.-J. Lim、S. Welinski、A. Ferrier、P. Goldner 和 J. J. L. Morton，《硅酸钇中镱离子的相干自旋动力学》，Physical Review B 97, 064409（2018年）。[107] A. Holzäpfel、J. Etesse、K. T. Kaczmarek、A. Tiranov、N. Gisin 和 M. Afzelius，《利用动态解耦在固态原子频率梳存储器中实现0.53秒的光存储》，New J Phys 22, 063009（2020年）。[108] M. Gündo˘gan、P. M. Ledingham、K. Kutluer、M. Mazzera 和 H. de Riedmatten，《用于时间箱量子比特的固态自旋波量子存储器》，Physical Review Letters 114, 230501（2015年）。[109] D. Schraft、M. Hain、N. Lorenz 和 T. Halfmann，《在 pr 3+：Y 2 sio 5 晶体中实现高存储效率的停止光》，Phys Rev Lett 116, 073602（2016年）。[110] G. Heinze、C. Hubrich 和 T. Halfmann，《利用电磁感应透明实现长达一分钟的停止光与图像存储》，Phys Rev Lett 111, 033601（2013年）。[111] A. Seri、A. Lenhard、D. Rieländer、M. Gündo˘gan、P. M. Ledingham、M. Mazzera 和 H. de Riedmat-ten，《单个电信光子与多模按需固态量子存储器之间的量子关联》，Phys Rev X 7, 021028（2017年）。[112] D. Lago-Rivera、S. Grandi、J. V. Rakonjac、A. Seri 和 H. de Riedmatten，《电信光子预示的多模固态量子存储器间纠缠》，Nature 594, 37（2021年）。[113] N. Maring、P. Farrera、K. Kutluer、M. Mazzera、G. Heinze 和 H. de Riedmatten，《冷原子气体与晶体之间的光子量子态传输》，Nature 551, 485（2017年）。

[114] A. Ortu、A. Holzäpfel、J. Etesse 和 M. Afzelius, 《稀土掺杂晶体中光子时间箱量子比特的存储时间最长可达20毫秒》, npj Quantum Inf 8, 29（2022年）。[115] G. Corrielli、A. Seri、M. Mazzera、R. Osellame 和 H. De Riedmatten, 《基于激光直写波导的集成光存储器》, Phys Rev Appl 5, 054013（2016年）。[116] L. You、J. Quan、Y. Wang、Y. Ma、X. Yang、Y. Liu、H. Li、J. Li、J. Wang、J. Liang、Z. Wang 和 X. Xie, 《用于航天应用的超导纳米线单光子探测系统》, Opt Express 26, 2965（2018年）。[117] N. T. Son、C. P. Anderson、A. Bourassa、K. C. Miao、C. Babin、M. Widmann、M. Niethammer、J. Ul Hassan、N. Morioka、I. G. Ivanov、F. Kaiser、J. Wrachtrup 和 D. D. Awschalom, 《发展用于量子自旋电子学的碳化硅》, Appl Phys Lett 116, 190501（2020年）。[118] C. Bradley、J. Randall、M. H. Abobeih、R. Berrevoets、M. Degen、M. Bakker、M. Markham、D. Twitchen 和 T. H. Taminiau, 《具有长达一分钟量子存储能力的十量子比特固态自旋寄存器》, Phys Rev X 9, 031045（2019年）。[119] A. Reiserer、N. Kalb、M. S. Blok、K. J. van Bemmelen、T. H. Taminiau、R. Hanson、D. J. Twitchen 和 M. Markham, 《利用核自旋抗退相干子空间实现稳健的量子网络存储器》, Phys Rev X 6, 021040（2016年）。[120] G. Balasubramanian、P. Neumann、D. Twitchen、M. Markham、R. Kolesov、N. Mizuochi、J. Isoya、J. Achard、J. Beck、J. Tissler、V. Jacques、P. R. Hemmer、F. Jelezko 和 J. Wrachtrup, 《同位素工程化金刚石中的超长自旋相干时间》, Nat Mater 8, 383（2009年）。[121] Y.-I. Sohn、S. Meesala、B. Pingault、H. A. Atikian、J. Holzgrafe、M. Gündo˘gan、C. Stavrakas、M. J. Stanley、A. Sipahigil、J. Choi、M. Zhang、J. L. Pacheco、J. Abraham、E. Bielejec、M. D. Lukin、M. Atatüre 和 M. Lon˘car, 《通过应变环境控制金刚石自旋量子比特的相干性》, Nat Commun 9, 1（2018年）。[122] R. Debroux、C. P. Michaels、C. M. Purser、N. Wan、M. E. Trusheim、J. Arjona Martínez、R. A. Parker、A. M. Stramma、K. C. Chen、L. de Santis、E. M. Alexeev、A. C. Ferrari、D. Englund、D. A. Gangloff 和 M. Atatüre, 《金刚石中锡空位自旋量子比特的量子控制》, Phys Rev X 11, 041041（2021年）。[123] D. D. Sukachev、A. Sipahigil、C. T. Nguyen、M. K. Bhaskar、R. E. Evans、F. Jelezko 和 M. D. Lukin, 《金刚石中的硅空位自旋量子比特：借助单次态读出实现超过10毫秒的量子存储器》, Phys Rev Lett 119, 223602（2017年）。

[124] M. K. Bhaskar, R. Riedinger, B. Machielse, D. S. Levonian, C. T. Nguyen, E. N. Knall, H. Park, D. Englund, M. Lonˇcar, D. D. Sukachev 和 M. D. Lukin, 《实验演示基于存储器增强的量子通信》, 《自然》580，60（2020年）。[125] B. Machielse, S. Bogdanovic, S. Meesala, S. Gauthier, M. Burek, G. Joe, M. Chalupnik, Y. Sohn, J. Holzgrafe, R. Evans, C. Chia, H. Atikian, M. Bhaskar, D. Sukachev, L. Shao, S. Maity, M. Lukin 和 M. Lonˇcar, 《纳米光子器件中机电稳定发射体的量子干涉》, Physical Review X 9，031022（2019年）。[126] N. H. Wan, T.-J. Lu, K. C. Chen, M. P. Walsh, M. E. Trusheim, L. D. Santis, E. A. Bersin, I. B. Harris, S. L. Mouradian, I. R. Christen, E. S. Bielejec 和 D. Englund, 《混合光子电路中人工原子的规模化集成》, 《自然》583，226（2020年）。[127] J. Wolters, A. W. Schell, G. Kewes, N. Nüsse, M. Schoengen, H. Döscher, T. Hannappel, B. Löchel, M. Barth 和 O. Benson, 《通过耦合至光子晶体腔增强纳米金刚石中单个氮空位中心的零声子线发射》, 《应用物理快报》97，141108（2010年）。[128] P. Siyushev, M. Nesladek, E. Bourgeois, M. Gulka, J. Hruby, T. Yamamoto, M. Trupke, T. Teraji, J. Isoya 和 F. Jelezko, 《金刚石中单个氮空位中心的光电成像与相干自旋态读出》, 《科学》363，728（2019年）。[129]A. Sipahigil, K. Jahnke, L. Rogers, T. Teraji, J. Isoya, A. Zibrov, F. Jelezko 和 M. Lukin, 《来自金刚石中相互分离的硅空位中心的不可区分光子》, 《物理评论快报》113，113602（2014年）。[130] N. Sangouard, R. Dubessy 和 C. Simon, 《基于单个囚禁离子的量子中继器》, Phys Rev A 79，042340（2009年）。[131] A. Reiserer 和 G. Rempe, 《基于单原子与光学光子的腔量子网络》, Rev Mod Phys 87，1379（2015年）。[132] S. Olmschenk, D. Matsukevich, P. Maunz, D. Hayes, L.-M. Duan 和 C. Monroe, 《远距离物质量子比特之间的量子隐形传态》, 《科学》323，486（2009年）。[133]H. J. Kimble, 《腔量子电动力学中单原子与光子的强相互作用》, Phys Scripta 1998，127（1998年）。[134] T. Wilk, S. C. Webster, A. Kuhn 和 G. Rempe, 《单原子单光子量子接口》, 《科学》317，488（2007年）。

[135] C. Junge, D. O’Shea, J. Volz 和 A. Rauschenbeutel, 《单原子与非横向光子之间的强耦合》, Physical Review Letters 110，213604（2013年）。[136] H. Takahashi, E. Kassa, C. Christoforou 和 M. Keller, 《单离子与光学腔的强耦合》，Physical Review Letters 124, 013602（2020年）。[137]J. Schupp, V. Krcmarsky, V. Krutyanskiy, M. Meraner, T. Northup 和 B. Lanyon, 《囚禁离子量子比特与传播光子之间近乎最优效率的接口》，《PRX量子》2，020331（2021年）。[138] P. Kobel, M. Breyer 和 M. Köhl, 《光纤法布里–珀罗腔中囚禁离子产生的确定性自旋—光子纠缠》，npj Quantum Inf 7，1（2021年）。[139] M. Körber, O. Morin, S. Langenfeld, A. Neuzner, S. Ritter 和 G. Rempe, 《单光子量子比特的抗退相干存储器》，《自然·光子学》12，18（2018年）。[140] N. Kalb, A. Reiserer, S. Ritter 和 G. Rempe, 《单原子中光子量子比特的预告式存储》，Phys Rev Lett 114，220501（2015年）。[141] T. Wilk, A. Gaëtan, C. Evellin, J. Wolters, Y. Miroshnychenko, P. Grangier 和 A. Browaeys, 《利用里德伯阻塞使两个独立中性原子纠缠》，Phys Rev Lett 104，010502（2010年）。[142]J. I. Cirac 和 P. Zoller, 《利用冷囚禁离子进行量子计算》，Phys Rev Lett 74, 4091（1995年）。[143] D. K. Oi, A. Ling, G. Vallone, P. Villoresi, S. Greenland, E. Kerr, M. Macdonald, H. We- infurter, H. Kuiper, E. Charbon 和 R. Ursin, 《立方体卫星量子通信任务》, EPJ Quantum Technol 4，1（2017年）。[144] H. Takenaka, A. Carrasco-Casado, M. Fujiwara, M. Kitamura, M. Sasaki 和 M. Toyoshima, 《利用50千克级微型卫星进行星地量子极限通信》，《自然·光子学》11，502（2017年）。[145] L. Mazzarella, M. Mohageg, D. V. Strekalov, A. J. Zhai, U. E. Israelsson, A. Matsko, N. Yu, C. Anastopoulos, B. Carpenter, J. R. Gallicchio, B.-L. Hu, T. Jennewein, P. Kwiat, S.-Y. Lin, A. Ling, C. Marquardt, M. Meister, B. S. Moffat, R. T. Newell, A. Roura, C. Schubert, G. Val- lone, P. Villoresi 和 L. Woerner, 《深空量子链路的目标与可行性》，载于《第十九届量子通信与量子成像》，第11835卷，由 K. S. Deacon 和 R. E. Meyers 编，国际光学与光子学学会（SPIE，2021年），第74–82页。[146] K. Günthner, I. Khan, D. Elser, B. Stiller, Ömer Bayraktar, C. R. Müller, K. Saucke, D. Trön- dle, F. Heine, S. Seel, P. Greulich, H. Zech, B. Gütlich, S. Philipp-May, C. Marquardt 和

G. Leuchs，来自地球静止卫星的光信号的量子极限测量，Optica **4**，611（2017年）。[147] T.-S. Yang、Z.-Q. Zhou、Y.-L. Hua、X. Liu、Z.-F. Li、P.-Y. Li、Y. Ma、C. Liu、P.-J. Liang 和 X. Li，基于多自由度量子存储器的多路复用存储与实时操控，《自然·通讯》**9**，1（2018年）。[148] S. Yang、Y. Wang、D. D. B. Rao、T. Hien Tran、A. S. Momenzadeh、M. Markham、D. J. Twitchen、P. Wang、W. Yang、R. Stöhr、P. Neumann、H. Kosaka 和 J. Wrachtrup，光子态在单个核自旋中的高保真传输与存储，《自然·光子学》**10**，507（2016年）。[149] B. Smutny、H. Kaempfner、G. Muehlnikel、U. Sterr、B. Wandernoth、F. Heine、U. Hildebrand、D. Dallmann、M. Reinhardt、A. Freier、R. Lange、K. Boehmer、T. Feldhaus、J. Mueller、A. Weichert、P. Greulich、S. Seel、R. Meyer 和 R. Czichy，5.6 Gbps 光学星间通信链路，载于SPIE会议论文集，H. Hemmati 编（SPIE，2009年）。[150] F. Heine、G. Mühlnikel、H. Zech、D. Tröndle、S. Seel、M. Motzigemba、R. Meyer、S. Philipp-May 和 E. Benzi，欧洲数据中继系统的激光通信终端：Alphasat 和 Sentinel 1A 激光通信终端的在轨调试，载于 SPIE会议论文集，H. Hemmati 和 D. M. Boroson 编（SPIE，2015年）。[151] G. Giorgi、T. Schmidt、C. Trainotti、R. Mata-Calvo、C. Fuchs、M. Hoque、J. Berdermann、J. Furthner、C. Günther、T. Schuldt、J. Sanjuan、M. Gohlke、M. Oswald、C. Braxmaier、K. Balidakis、G. Dick、F. Flechtner、M. Ge、S. Glaser、R. König、G. Michalak、M. Mur- böck、M. Semmling 和 H. Schuh，卫星导航与大地测量学的先进技术，Advances inSpace Research **64**，1256（2019年）。[152]T. Schuldt、M. Gohlke、M. Oswald、J. Wüst、T. Blomberg、K. Döringshoff、A. Bawamia、A. Wicht、M. Lezius、K. Voss、M. Krutzik、S. Herrmann、E. Kovalchuk、A. Peters 和 C. Braxmaier，全球卫星导航系统的光学钟技术，GPS Solutions **25**，10.1007/s10291-021-01113-2 （2021年）。