作为暗物质卤检器的长基线量子传感器网络

Min Jiang，[1,2,3,a)] Taizhou Hong，[1,2,3,a)] Dongdong Hu，[4,3,a)] Yifan Chen，[5] Fengwei Yang，[6] Tao Hu，[7] Xiaodong Yang，[7] Jing Shu，[8,9,10,b)] Yue Zhao，[6,c)] Xinhua Peng，[1,2,3,d)] 和 Jiangfeng Du[1,2,3,11]

1)中国科学技术大学微尺度磁共振中国科学院重点实验室暨物理科学学院，安徽合肥 *230026*，中国 2)中国科学技术大学中国科学院量子信息与量子物理卓越创新中心，安徽合肥 *230026*，中国 3)中国科学技术大学合肥国家实验室，合肥 *230088*，中国 4)中国科学技术大学粒子探测与电子学国家重点实验室，安徽合肥 *230026*，中国 5)尼尔斯·玻尔国际学院，尼尔斯·玻尔研究所，*Blegdamsvej 17*，哥本哈根 *2100*，丹麦 6)犹他大学物理与天文学系，美国犹他州盐湖城 *84112* 7)中国科学院苏州生物医学工程技术研究所，江苏苏州 *215163*，中国 8)北京大学物理学院暨核物理与核技术国家重点实验室，北京 *100871*，中国 9)北京大学高能物理研究中心，北京 *100871*，中国 10)北京激光加速创新中心，北京怀柔 *101400*，中国 11)浙江大学量子传感研究所暨物理学院，杭州 *310027*，中国

arXiv:2305.00890v2 [quant-ph] 9 Aug 2024

（日期：2024年8月26日）

超轻暗光子是暗物质一个理论依据充分的候选者。通过动能混合机制与标准模型光子耦合时，暗光子预计会诱导出相干电磁波，并且在暗光子的德布罗意波长范围内呈现空间相关性。本文报告了首次利用由15台原子磁力计组成的长基线网络搜索相关暗光子信号的结果。这些磁力计分布在两个彼此分隔的、相距约1700公里的米级屏蔽室中。网络中的多个传感器以及屏蔽室的大尺寸，均显著增强了预期的暗光子电磁信号；长基线测量则能够有效排除许多局部噪声源。利用该网络，我们对质量范围为4.1飞电子伏至2.1皮电子伏的暗光子暗物质动能混合系数作出了限制；在上述质量范围内，这是所有地面实验给出的最严格限制。我们的预测表明，未来发布的数据可能超越来自宇宙微波背景辐射和等离子体加热的天体物理学限制。

尽管过去八十年来已有天体物理学证据支持暗物质的存在，但对其与标准模型粒子和场之间非引力相互作用的直接探测仍然难以实现。为此，人们提出了许多理论，其中不少理论假设存在超出标准模型的新基本粒子，这些粒子可能构成暗物质。在这些候选者中，诸如轴子[1–3]和暗光子[4]之类的一类超轻玻色子尤为有充分理论依据。这些玻色子的存在是包含额外维度[5–8]的基本理论自然预言的。当它们的质量低于 $\mathcal{O}(1)$ eV 时，在给定的关联长度和时间内，它们表现为具有大占据数的相干波。

人们已开展大量实验以探测超轻玻色暗物质。迄今为止，先前的搜索主要聚焦于利用逆Primakoff效应的轴子和类轴子粒子；在强磁场背景下，这些粒子会转化为光子[9–12]。此类实验包括ADMX[13]，CAPP[14]，HAYSTAC[15]，ORGAN[16]，DM Radio[17]，和ABRACADABRA[18]。另一方面，对动能混合暗光子暗物质的实验室搜索(DPDM)不依赖于电磁背景场。DPDM 可通过有效振荡电流在电磁屏蔽室中产生谐振腔模式或磁场[19]。由于探测机制相似，先前对轴子-光子耦合的限制已被重新诠释为对 DPDM 的限制[20]。最近，研究者还采用多种策略搜寻 DPDM，包括谐振LC电路[19]，碟形天线[21]，地磁场[22]，原子光谱学[23]，和射电望远镜[24]。一些实验，例如FUNK[25]，SuperMAG[26]，和 QUALIPHIDE[27]，已对 DPDM 给出了实验限制。然而，低于 neV 的 DPDM 质量限制大多依赖于天体物理学和宇宙学观测，例如等离子体的异常加热[28–31] 以及宇宙微波背景辐射（CMB）的畸变[31,32]，这两者都依赖于天体物理学建模。

在本文中，我们展示了首次开展的大型屏蔽体中同步原子磁力计阵列暗光子搜索（AMAILS）。该阵列由15台原子磁力计组成，分别部署在中国哈尔滨和苏州的两间独立电磁屏蔽室中，两地相距约1700公里（图1a），并通过全球定位系统（GPS）实现同步。这些磁力计具有飞特斯拉级的超高灵敏度，能够测量屏蔽室壁附近由DPDM诱发的磁场射频信号。通过对网络中相互分离的磁力计读数进行关联分析，我们报告了首个长基线网络——

a)这些作者对本研究的贡献相同
b)jshu@pku.edu.cn c)zhaoyue@physics.utah.edu d)xhpeng@ustc.edu.cn

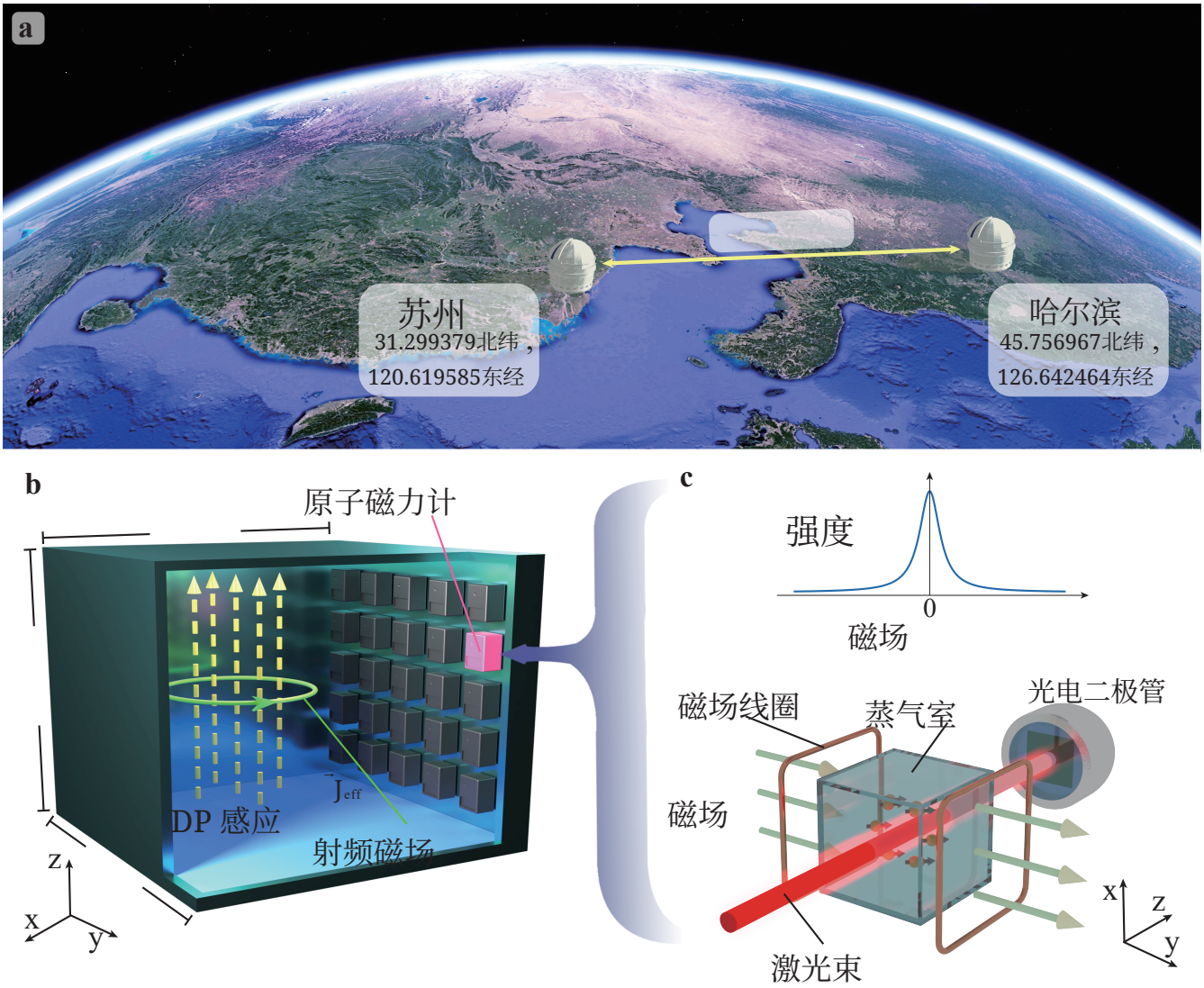

图 1. **量子传感器网络**。**a**，由 15 台原子磁力计组成的网络，分布在中国苏州和哈尔滨的两个独立屏蔽室内，两地相距 1692 公里。这些磁力计与全球定位系统同步。**b**，暗光子暗物质（DPDM）在屏蔽室内感应产生射频信号的示意图。每个屏蔽室均由五层坡莫合金构成，最内层尺寸为 $2 \times 2 \times 2\ \mathrm{m}^3$。DP 电流 $\vec{\mathbf{J}}_{\mathrm{eff}}$ 可沿z方向产生磁场（虚线）。微型原子磁力计（QuSpin公司）安装在屏蔽室表面，用于探测沿y 方向、平行于墙壁的 DP 感应磁场（绿色圆圈）。**c**，基于零场共振的原子磁力计示意图。上图为零场下的工作状态；下图为在测量磁场下的工作状态，该磁场会导致碱金属自旋进动，并降低透射光强度。

由量子传感器构成的网络，在相距超过1000公里的范围内搜索DPDM关联信号。我们的实验对描述暗光子动能混合的参数空间施加了限制，涵盖从4.1飞电子伏特到2.1皮电子伏特的质量范围，灵敏度超过了当前最先进的地面DPDM搜索实验[33–35]。我们想强调，本文与其他研究采用的暗物质搜索方法有所不同。此前针对波状暗物质的搜索实验大多局限于使用单个探测器搜索局域信号[17–19]，难以有把握地区分暗物质信号与局域技术噪声。近期已有研究提出[36–38] 或展示了利用联网量子传感器搜索暗物质的方法，包括全球光学磁力计网络（GNOME）[39], 原子钟和光学钟网络[40,41]。此类网络考虑的是暗物质粒子彼此相互作用并产生拓扑缺陷，而非波状暗物质的情形。此前的研究[26] 采用 SuperMAG 网络探索 DPDM；该网络最初旨在利用经典磁力计测量地球的磁场。相比之下，我们的研究采用专门用于暗物质研究的量子磁力计，使我们具备更大的改进潜力，并能够在不同质量范围内融入新颖功能。尽管 GNOME 网络有潜力用于波状 DPDM 搜索，但其

光学磁力计通常放置在小型屏蔽室的中心，其最内层直径一般约为 10 cm。在这种情况下，DPDM 信号比我们实验中的信号小约三个数量级（补充材料第一节，图 S1）。不同于以往的研究，我们的工作为利用长基线量子传感器搜索波状暗物质开辟了引人入胜的机会；经过进一步优化，有望探索超出由异常等离子体加热[28–31]和宇宙微波背景辐射畸变[31]所施加的天体物理学限制之外的未知参数空间。

暗光子是一种新的有质量 U(1)规范玻色子，它通过相互作用项 $\varepsilon F_{\mu\nu}F'^{\mu\nu}/2$ [19,24]与电磁光子发生动能混合。这里，$F^{\mu\nu}$ 和 $F'^{\mu\nu}$分别表示电磁学和暗光子的场强张量，ε 表示二者之间的动能混合系数。当暗光子的质量$m_{A'}$ 低于 $\mathcal{O}(1)$ eV 时，暗光子表现为相干波，其频率几乎等于$m_{A'}$。由于暗光子与电磁光子之间的混合，暗光子能够在电磁屏蔽室的壁内诱导电子发生谐振荡（图1b）。因此，这会产生一种可用有效电流$\mathbf{J}_{\rm eff}$描述的单色无线电信号。在相互作用基底中，暗光子具体会产生有效电磁电流$J^{\mu}\ \mathrm{eff} = -\varepsilon m_{A'}^2 A'^{\mu}$ [19]，其中A'_{μ} 是暗光子的规范势。电流强度可根据银河系暗物质能量密度 $\rho \approx m_{A'}^2|\vec{\mathbf{A}}'^2|/2 \approx 0.45\mathrm{GeV/cm^3}$ [1, 2, 3]进行估算。暗光子电动力学的详细内容见补充材料第一节。

为探测有效电流产生的电磁信号，我们使用能够转换其内部磁场的米级电磁屏蔽体。我们的实验装置由一个同步原子磁力计网络构成，磁力计分别在两个独立的屏蔽室内运行：一个位于哈尔滨，另一个位于苏州，两者相距 1692 km（图1a）。两个屏蔽室均由五层坡莫合金制成，最内层呈长方体形状，尺寸为 $2\times2\times2\,\mathrm{m}^3$。磁力计探测沿$\vec{\mathbf{J}}_{\rm eff}$ 方向的 DPDM 诱导z轴向有效电流，该电流随后产生平行于墙壁、沿水平方向切向传播的射频 B 场。该现象的示意图见图1b，补充材料第 I 节也对此进行了讨论。我们发现，场信号在墙壁表面达到最大值。屏蔽室墙壁附近这种振荡磁场的振幅可近似表示为

$$B \approx |\vec{\mathbf{J}}_{\rm eff}|\, V^{1/3} \approx 1.63\times10^{-12}\,\varepsilon\left(\frac{m_{A'}}{10\,\mathrm{Hz}}\right)\left(\frac{V^{1/3}}{1\,\mathrm{m}}\right)\mathrm{T}, \quad (1)$$

并且在接近屏蔽室中心时变小。重要的是，DPDM 诱导的磁场强度与屏蔽室的长度尺度$V^{1/3}$ 成正比。这意味着，更大的屏蔽室类似于用于收集微弱无线电信号的雷达，能够显著提升对 DPDM 的搜索能力。

我们使用原子磁力计作为 DPDM 探测器。原子磁力计被认为是一种量子传感器[42]，它利用一种称为自旋交换弛豫自由（SERF）效应的量子现象[43,44]，，从而延长原子相干时间并提高测量灵敏度。如图1c 所示，我们使用的每台磁力计都包含一个蒸气室，内装数毫克同位素富集的 ^{87}Rb，以及约 700 torr 的缓冲气体 N_2。为使 ^{87}Rb 原子实现光泵极化，我们使用圆偏振激光束，其频率调谐至缓冲气体展宽并移动后的 D1谱线中心。无磁场时，自旋磁矩与泵浦光束方向一致，使透射至光电二极管的激光达到最大值。然而，垂直于光束的磁场会引发拉莫尔进动，使磁矩偏离原有方向，进而导致透光量可检测地下降。这种效应会产生零场共振，可作为高灵敏度的磁场指示信号。我们的网络采用 QuSpin公司制造的微型 SERF 磁力计，尺寸仅为几厘米，磁场灵敏度约为 15 $\mathrm{fT/Hz^{1/2}}$。

我们方法的核心是在两个相互分离的观测站中安装一组原子磁力计。根据我们搜索的暗光子质量范围，DPDM 的关联长度（$\approx 10^{-6}\mathrm{eV}/m_{A'}\,\mathrm{km}$）大于上述两个观测站之间的基线（~1700km）。因此，DPDM 会在所有空间分离的传感器中产生相关的共模磁场。原则上，单个原子磁力计可以探测来自 DPDM 的无线电信号，但在现实的实验条件下，要有把握地将 DPDM 暗物质信号与众多噪声源区分开来十分困难。为解决这一问题，我们同时监测多个磁力计，其中苏州站安装了 13 个磁力计，哈尔滨站安装了 2 个磁力计，以便从其相关信号中提取潜在事件。这些磁力计的磁场数据通过定制的数据采集系统记录，并与 GPS 时间同步。我们计算图2a 所示每一对磁力计的互相关谱，其中包括计算同一屏蔽室内磁力计之间以及不同屏蔽室内磁力计之间的互相关。例如，图2b 展示了两个磁力计的互相关谱，其中一些尖锐的技术噪声只出现在其中一个传感器中，因而可以轻易识别。量子传感器网络的详细信息见补充材料第三节。

我们的暗光子暗物质搜索灵敏度会随着网络中量子传感器数量的增加而提升。总共有$C_{15}^2 = 105$ 个相关器，使我们能够获得每对同步磁力计的互相关谱。我们将所有互相关谱的平均谱绘制为相关器数量 $\mathcal{N}$(图2c）。结果表明，不同频率下的磁场灵敏度均显著提升，即从约 15 $\mathrm{fT/Hz^{1/2}}$ 提升至仅几 $\mathrm{fT/Hz^{1/2}}$。为清楚说明这一点，我们将 10.1 赫兹处的灵敏度绘制为相关器数量 $\mathcal{N}$ 的函数，如图2d 所示。相应的灵敏度数据可以很好地用以下函数拟合：

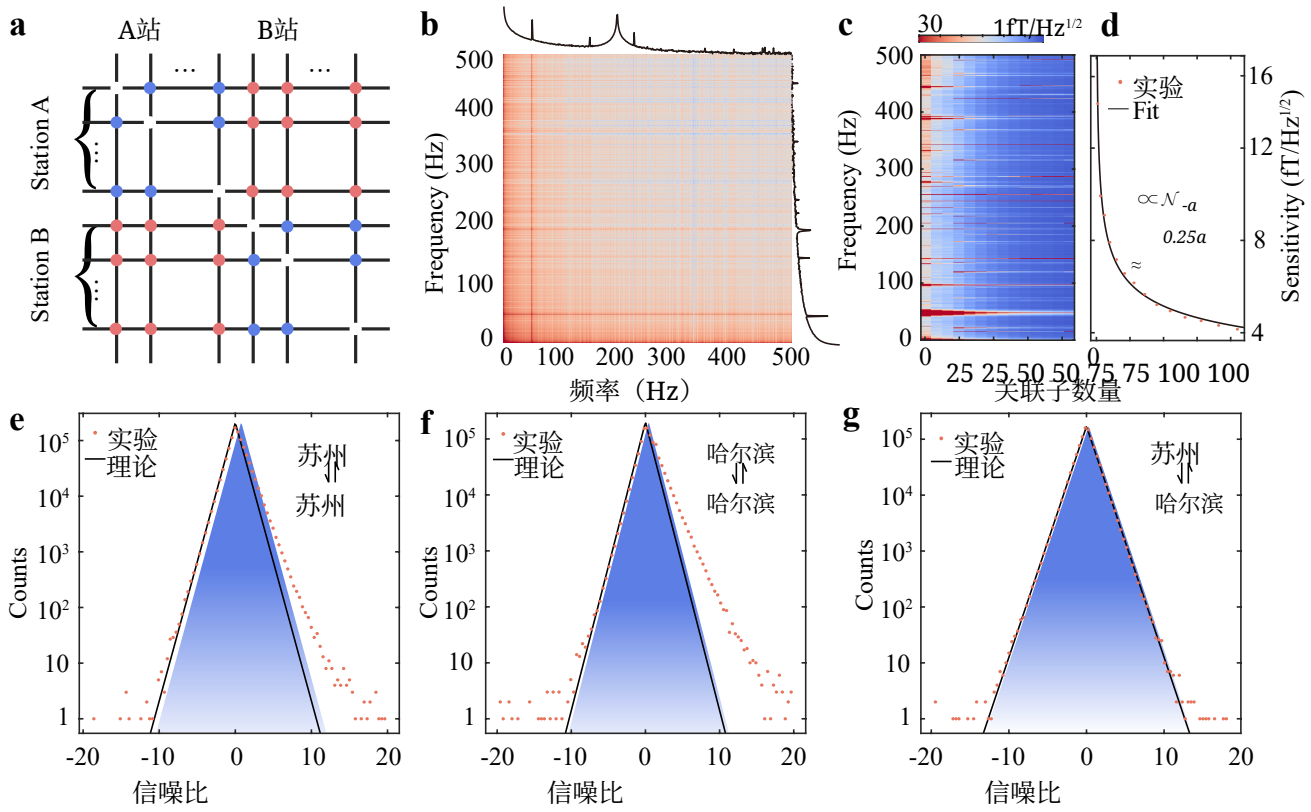

图 2. **传感器网络互相关**。**a**，位于 A站（苏州）和 B站（哈尔滨）的原子磁力计之间互相关示意图。蓝点和红点分别表示来自同一站内磁力计和不同站点磁力计的互相关。**b**，两个传感器的二维互相关谱。**c**和**d**，网络灵敏度随相关器数量 $\mathcal{N}$ 的变化。以 10.1 赫兹为例，网络的磁灵敏度随相关器数量增加而提高，并可用函数 $\mathcal{N}^{-a}(a \approx 0.25)$ 拟合。两个传感器之间互相关谱的信噪比（SNR）分布：**e**，苏州站内的两个传感器；**f**，哈尔滨的两个传感器；**g**，一个传感器位于苏州站，另一个位于哈尔滨站。**e**和**f**中的信噪比分布不对称，这是由于屏蔽室的共模磁噪声（$\approx 5\,\mathrm{fT/Hz^{1/2}}$）仅对信噪比的正值部分有贡献。相比之下，来自不同站点的两个传感器的信噪比分布是对称的，不受共模噪声影响。

的函数 $\mathcal{N}^{-a}$，其中 $a \approx 0.25$。最后，网络灵敏度在 10.1 赫兹处接近 4.2 $\mathrm{fT/Hz^{1/2}}$。如图2c 所示，在大多数其他频率下，网络灵敏度也达到这一水平。

我们进一步分析了实部互相关谱在 1–500 Hz 范围内所有数据点的信噪比（SNR）分布（补充材料第四节）。具体而言，我们绘制了位于同一屏蔽室内的两台磁力计的信噪比分布，例如苏州站（图2e）或哈尔滨站（图2f）。两者均呈现出意料之外的不对称分布，右侧略高于左侧，与理论预测不符（见蓝色阴影区域）。通过数值模拟，我们发现这是由屏蔽室的共模磁场导致的（补充材料第五节）。共模噪声估计约为 5 $\mathrm{fT/Hz^{1/2}}$，这与对屏蔽室内磁噪声的直接计算结果一致。相比之下，哈尔滨和苏州两地磁力计之间长基线互相关的信噪比分布则呈对称状（图2g），因为两台磁力计位于不同的屏蔽室中，其噪声彼此不相关。这表明分布式传感器具有区分共模噪声的独特能力。例如，图2e 中有 21628 个数据点落在理论预测区域之外。相比之下，图2g 中只有 1349 个点落在该区域之外，表明噪声显著抑制了 16 倍。根据数值模拟结果，主要的共模噪声来自屏蔽室。不过，也存在可能影响实验的大尺度噪声，例如太阳风、地磁暴和舒曼共振；将这两个站点远距离分开，能够有效降低这些噪声。

在建立网络技术后，我们在 1 至 500 Hz 的频率范围内对暗光子暗物质开展宽带搜索，对应的暗光子质量范围为 4.1 feV 至 2.1 peV。在整个实验过程中，我们确保所有量子传感器均与 GPS 时间准确同步，并记录 2000 秒的信号数据；此外，我们计算所有成对的互相关谱，并

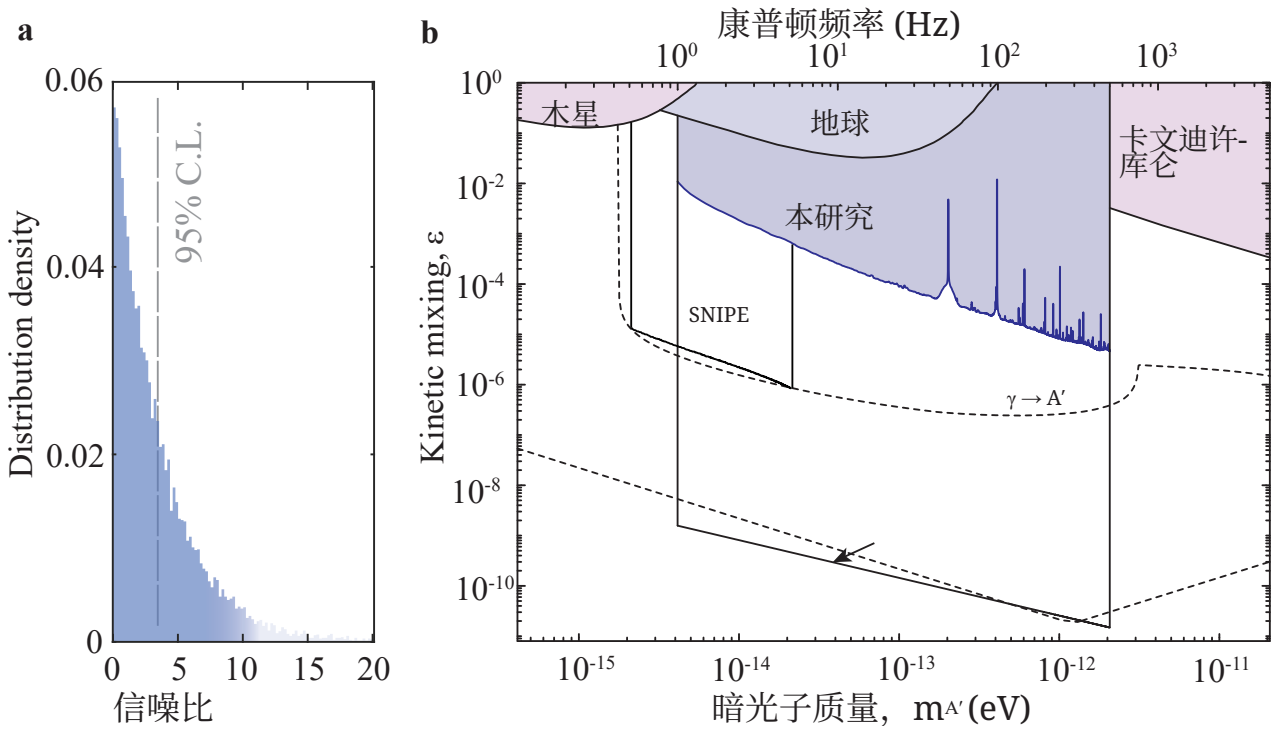

图 3. **暗光子暗物质搜索结果**。 **a**，网络平均互相关谱的信噪比分布。95% 置信水平（C.L.）通过蒙特卡洛模拟确定。 **b**，暗光子暗物质动能混合 ε 在质量范围 4.1 feV 至 2.1 peV 内的限制。蓝色阴影区域表示我们的网络测量在 95% 置信水平下排除的范围。黑线显示升级后的磁力计网络未来的预期灵敏度。浅蓝色阴影区域表示基于地面或地外实验得出的其他限制，包括观测地球的磁场[33] 和木星的磁场[34], , 以及在安静磁环境中使用磁力计网络进行的测量（SNIPE）[45], 和卡文迪许-库仑实验[35]。虚线表示来自宇宙学和天体物理观测的限制，包括宇宙微波背景辐射（CMB）光子向暗光子的转变[31,32], 以及 DPDM 对等离子体的加热[28–30]。

计算它们的平均谱，并生成平均谱的信噪比分布，如图 3a 所示。为确定检测阈值，我们开展蒙特卡罗模拟，以估计与测得的动能混合系数 ε 相关的信噪比 95% 置信水平（C.L.）（图3a）。我们的分析流程得到 318863 个超过 95% C.L. 的潜在 DPDM 候选者。我们验证真实 DPDM 信号存在的可能性，并排除了所有候选者。我们通过将模拟的 DPDM 信号注入数据，检查数据分析流程的可行性，并确认该分析方法能够以正确的动能混合系数恢复这些信号。数据处理、排除和检验的详细流程见补充材料第 VI 和 VII 节。

图3b 展示了我们对动能混合系数的最新限制 ε，置信度为 95%。本研究探索的质量范围为 4.1 feV 至 2.1peV，与地球[33] 和木星[34] 实验以及卡文迪许-库仑实验[46],的范围重叠，并显著改进了此前的限制。例如，我们的实验在 $\varepsilon \approx 5 \times 10^{-6}$2.1 peV 处给出了限制，较卡文迪许-库仑实验此前的限制提高了约三个数量级。我们还在图3b 中展示了与天体物理学限制的比较，例如，宇宙微波背景辐射光子子向暗光子的转变[31,32], 暗物质在等离子体中引起的加热[29], 星际介质[28], 以及矮星系 Leo T[30]。这些限制高度依赖于这些系统的冷却速率及其冷却机制的相关认识。此外，我们注意到，通过对氦 II 再电离时期的能量沉积施加上限，并利用莱曼-α 观测[31,32]，可以得到严格的限制。然而，这些限制会受到显著天体物理学不确定性的影响，因此会随若干关键因素而变化：（i）早期等离子体质量的概率密度函数，尤其是其尾部分布；（ii）密度扰动尺度的最大截断值；以及（iii）能量注入的传输过程，这与灵敏度函数和阈值的选择有关。鉴于上述不确定性，有必要开展地面实验，以研究相近的质量范围。

预计实验对暗光子暗物质的灵敏度将进一步提升。将空间上彼此分离的磁力计数量增加至 1000 台，可使 DPDM 搜索灵敏度提高约 10 倍；另一个值得考虑的因素是屏蔽室的尺度。将其扩展至 20 米，可最大限度地增强潜在的暗光子信号。事实上，许多大型

脑部脑磁图和心脏心磁图领域已经建有坡莫合金屏蔽室[47,48]。这些屏蔽室内合计安装了 1000 多台小型磁力计，在无人使用期间有望改作 DPDM 搜索网络。此外，另一种高效方法是优化原子磁力计的磁灵敏度；目前这类磁力计距离达到标准量子极限还相当遥远。随着量子技术的发展，其灵敏度有望接近 0.01fT/Hz 的标准量子极限 $^{1/2}$。若要进一步提高灵敏度，一种前景可观的策略是在每个屏蔽室内的不同位置或朝向安装磁力计。随后，可将这些磁力计收集到的信息整合成阵列，从而有效降低局部共模噪声（见补充信息第 I 节）。利用这些前景可观的磁力计并进行一年的积分时间，我们可以显著提高搜索灵敏度，使其较当前极限提升多达 6 个数量级，如图 3b 中的实线所示。这将开辟探索尚未涉足参数空间的途径，突破宇宙微波背景辐射畸变所施加的天体物理约束[31,32] 和等离子体加热[28–30]。

纳入其他类型的磁力计有助于拓展暗光子搜索的质量范围。正如文献 [49], 所示，射频原子磁力计的灵敏度已达到低于 1 fT/Hz$^{1/2}$，可在 10 kHz 至 10 MHz 的质量范围内搜索暗光子。例如，近期研究在 300 kHz 处实现了 0.5 fT/Hz$^{1/2}$ 的噪声底 [49],，在积分时间为 100 s 时，暗光子搜索灵敏度达到 $\varepsilon \approx 10^{-10}$。这一出色的灵敏度至少比宇宙微波背景辐射给出的限制高出三个数量级[31,32]。在更高频段，可利用氮空位中心磁力计探测暗光子；这类磁力计近期在 GHz 微波探测中展现了 ∼10pT/Hz$^{1/2}$ 的灵敏度[50,51]。若要探测 mHz 至 Hz 范围内更低的质量，可使用在 Hz 范围具有高灵敏度的惰性气体自旋脉泽[52,53]，或将磁力计安装在稳定旋转台上，把 DPDM 诱导的低频场转换至更高频率。

总之，我们展示了一种位于大型屏蔽室中的同步原子磁力计网络，用于搜寻暗光子暗物质。这里我们假设 DPDM 在维里化后形成的动量分布符合标准晕模型。不过，必须指出，其他类型的暗物质分布也已得到考虑[54–56]，例如因银河系并合而形成的局部冷流等各向异性分布。此外，黑洞[57] 或其他宇宙学源也可能产生暗光子通量，而这些通量未必是暗物质的主要形式。我们的网络有望在确定这些源的性质方面发挥重要作用[38,58]。利用每个屏蔽室内的方向探测，以及彼此相隔较远的屏蔽室之间的长基线，有望实现出色的定位。因此，这样一个同步量子传感器网络可以将多信使天文学观测与引力波探测器和电磁观测台关联起来[59]。

补充说明。完成这项工作后，我们了解到近期有一项关于搜寻隐藏光子和轴子暗物质的研究。文献 [45], 中的这项工作将频率范围为 0.5 至 5 Hz 的暗光子排除在外，并将动能混合参数限制在 1×10^{-5} 至 1×10^{-6}。

[1]Preskill, J.、Wise, M. B. 与 Wilczek, F. 不可见轴子的宇宙学。《物理学快报 B》120，127–132（1983年）。[2]Abbott, L. 与 Sikivie, P. 关于不可见轴子的宇宙学界限。《物理学快报 B》120，133–136（1983年）。[3]Dine, M. 与 Fischler, W. 并非无害的轴子。《物理学快报 B》120，137 141 1983年–（）。[4]Nelson, A. E. 与 Scholtz, J. 暗光、暗物质与错位机制。《物理评论 D》84，103501（2011年）。1105.2812。[5]Svrcek, P. 与 Witten, E. 弦理论中的轴子。《高能物理学杂志》06，051（2006年）。hep-th/0605206。[6]Abel, S. A.、Goodsell, M. D.、Jaeckel, J.、Khoze, V. V. 与 Ringwald, A. 弦现象学中光子与隐藏 U(1) 的动能混合。《高能物理学杂志》07，124（2008年）。0803.1449。[7]Arvanitaki, A.、Dimopoulos, S.、Dubovsky, S.、Kaloper, N. 与 March- Russell, J. 弦轴子宇宙。《物理评论 D》81，123530（2010年）。0905.4720。[8] Goodsell, M.、Jaeckel, J.、Redondo, J. 与 Ringwald, A. 大体积弦紧化中的自然轻隐藏光子。《高能物理学杂志》11，027 2009 0909 0515（）。。。[9]Sikivie, P. 不可见轴子的实验检验。《物理评论快报》 **51**, 1415 1417 1983 [52, 695 1984] –（）。勘误：《物理评论快报》（）。[10]Sikivie, P. “不可见”轴子搜索的探测率。《物理评论 D》 **32**, 2988 1985 [36, 974 1987] （）。勘误：《物理评论 D》（）。[11]Sikivie, P.、Sullivan, N. 与 Tanner, D. 使用 LC 电路探测轴子暗物质的方案。《物理评论快报》112，131301（2014年）。1310.8545。[12]Kahn, Y.、Safdi, B. R. 与 Thaler, J. 轴子暗物质探测的宽带与共振方法。《物理评论快报》117，141801（2016年）。1602.01086。[13]Bartram, C. 等。3.3-4.2 μeV 质量范围内“不可见”轴子暗物质的搜索（2021年）。2110.06096。[14]Kwon, O. 等。CAPP 在 10.7 μeV 附近轴子晕探测器的首批结果。《物理评论快报》126，191802（2021年）。2012.10764。[15]Backes, K. M. 等。量子增强的暗物质轴子搜索。《自然》590，238–242（2021年）。2008.01853。[16]McAllister, B. T. 等。ORGAN 实验：15 GHz 以上的轴子晕探测器。《物理暗宇宙》18，67–72（2017年）。1706.00209。[17]Brouwer, L. 等。DMRadio-m^3：1 μeV 以下 QCD 轴子的搜索（2022年）。2204.13781。[18]Salemi, C. P. 等。使用 ABRACADABRA-10 cm 搜索低质量轴子暗物质。《物理评论快报》127，081801（2021年）。2102.06722。[19]Chaudhuri, S. 等。用于探测隐藏光子暗物质的无线电。《物理评论 D》92，075012（2015年）。1411.7382。[20]Caputo, A.、Millar, A. J.、O’Hare, C. A. J. 与 Vitagliano, E. 暗光子限制：手册。《物理评论 D》104，095029（2021年）。2105.04565。[21]Horns, D. 等。使用盘形天线搜索 WISPy 冷暗物质。《宇宙学与天体粒子物理学杂志》04，016（2013年）。1212.2970。[22] Fedderke, M. A.、Graham, P. W.、Kimball, D. F. J. 与 Kalia, S. 地球作为暗光子暗物质探测的换能器。《物理评论 D》104，075023（2021年）。2106.00022。[23]Berger, J. 与 Bhoonah, A. 通过精密原子光谱学首次获得的超轻暗光子暗物质实验室界限（2022年）。2206.06364。[24]An, H. 等。使用射电望远镜直接探测暗光子暗物质。《物理评论快报》130，181001（2023年）。[25]Andrianavalomahefa, A. 等。FUNK 实验对可见光和近紫外波长范围内隐藏光子暗物质混合强度的限制。《物理评论 D》102，042001（2020年）。2003.13144。

[26]Fedderke, M. A., Graham, P. W., Jackson Kimball, D. F. 和 Kalia, S. 在 SuperMAG 地磁场数据集中搜寻暗光子暗物质。《物理评论D》104，095032（2021年）。2108.08852。[27]Ramanathan, K. 等。利用 QUALIPHIDE 实验对隐藏光子暗物质进行宽带直接探测的限制（2022年）。2209.03419。[28]Dubovsky, S. 和 Hern´ández-Chifflet, G. 利用隐藏光子加热银河系。《宇宙学与天体粒子物理学杂志》12，054（2015年）。1509.00039。[29]Bhoonah, A., Bramante, J., Elahi, F. 和 Schon, S. 银河系中心气体云对超轻暗光子、矢量门户、强相互作用、复合及超重暗物质的新限制。《物理评论D》100，023001（2019年）。1812.10919。[30]Wadekar, D. 和 Farrar, G. R. 富气体矮星系：探测暗物质与普通物质相互作用的新方法。《物理评论D》103，123028（2021年）。1903.12190。[31]Caputo, A., Liu, H., Mishra-Sharma, S. 和 Ruderman, J. T. 我们非均匀宇宙中的暗光子振荡。《物理评论快报》125，221303（2020年）。2002.05165。[32]McDermott, S. D. 和 Witte, S. J. 轻暗光子暗物质的宇宙学演化。《物理评论D》101，063030（2020年）。1911.05086。[33]Goldhaber, A. S. 和 Nieto, M. M. 光子质量的地球及地外限制。《现代物理评论》43，277（1971年）。[34]Davis Jr, L., Goldhaber, A. S. 和 Nieto, M. M. 根据先驱者10号对木星磁场的观测推导出的光子质量限制。《物理评论快报》35，1402（1975年）。[35]Kroff, D. 和 Malta, P. C. 通过原子力显微镜测量和 Plimpton-Lawton 实验限制隐藏光子。《物理评论D》102，095015（2020年）。2008.02209。[36]Derevianko, A. 和 Pospelov, M. 利用原子钟搜寻拓扑暗物质。《自然·物理》10，933–936（2014年）。[37]Derevianko, A. 利用精密测量工具网络探测暗物质波。《物理评论A》97，042506（2018年）。[38]Chen, Y., Jiang, M., Shu, J., Xue, X. 和 Zeng, Y. 利用矢量传感器网络剖析轴子与暗光子。《物理评论研究》4，033080（2022年）。2111.06732。[39]Afach, S. 等。利用光学磁力仪全球网络搜寻拓扑缺陷暗物质。《自然·物理》17，1396–1401（2021年）。[40]Wcisło, P. 等。来自光学原子钟全球网络的暗物质耦合新限制。《科学进展》4，eaau4869（2018年）。[41]Roberts, B. M. 等。利用全球定位系统卫星上的原子钟搜寻畴壁暗物质。《自然·通讯》8，1195（2017年）。[42]Degen, C. L., Reinhard, F. 和 Cappellaro, P. 量子传感。《现代物理评论》89，035002（2017年）。[43]Kominis, I., Kornack, T., Allred, J. 和 Romalis, M. V. 亚飞特斯拉多通道原子磁力计。《自然》422，596–599（2003年）。[44]Jiang, M. 等。零场核磁共振中量子控制的实验基准测试。《科学进展》4，eaar6327（2018年）。[45]Sulai, I. A. 等。在荒野中搜寻隐藏光子和轴子暗物质的磁信号。《物理评论D》108，096026（2023年）。[46]Bartlett, D. F. 和 Loegl, S. 电磁第五种力的限制。《物理评论快报》61，2285–2287（1988年）。[47]Boto, E. 等。借助可穿戴系统推动脑磁图走向现实应用。《自然》555，657–661（2018年）。[48]Aslam, N. 等。量子传感器的生物医学应用。《自然综述：物理学》5，157–169（2023年）。[49]Sheng, D., Li, S., Dural, N. 和 Romalis, M. V. 利用多通池进行亚飞特斯拉标量原子磁力测量。《物理评论快报》110，160802（2013年）。[50]Wang, Z. 等。利用金刚石传感器对微波场进行皮特斯拉磁力测量。《科学进展》8，eabq8158（2022年）。[51]Chen, X.-D. 等。利用固态自旋实现量子增强的无线电探测与测距。《自然·通讯》14，1288（2023年）。[52]Jiang, M., Su, H., Wu, Z., Peng, X. 和 Budker, D. Floquet 微波激射器。《科学进展》7，eabe0719（2021年）。[53]Jiang, M., Su, H., Garcon, A., Peng, X. & Budker, D. 利用自旋放大器搜寻类轴子暗物质。《自然·物理》**17**, 1402–1407 (2021年). [54]O'Hare, C. A. J. & Green, A. M. 利用微波腔实验开展轴子天文学。*Phys. Rev. D* **95**, 063017 (2017年). 1701.03118.[55]Foster, J. W., Rodd, N. L. & Safdi, B. R. 通过轴子直接探测揭示暗物质晕。*Phys. Rev. D* **97**, 123006 (2018年). 1711.10489. [56]Knirck, S., Millar, A. J., O'Hare, C. A. J., Redondo, J. & Steffen, F. D. 方向性轴子探测。《宇宙学与天体粒子物理学杂志》**11**, 051 (2018年). 1806.05927. [57]East, W. E. 借助希格斯机制，暗光子黑洞超辐射中的涡旋弦形成。*Phys. Rev. Lett.* **129**, 141103 (2022年). 2205.03417. [58]Foster, J. W., Kahn, Y., Nguyen, R., Rodd, N. L. & Safdi, B. R. 暗物质干涉测量。*Phys. Rev. D* **103**, 076018 (2021年). 2009.14201. [59]Dailey, C. 等量子传感器网络：用于多信使天文学的奇异场望远镜。*Nature Astron.* **5**, 150–158 (2021年). 2002.04352.

代码可用性。本文图表所用代码可向通讯作者提出合理请求后获取。

致谢。本研究获得量子科学与技术创新计划（项目编号：2021ZD0303205）、中国国家自然科学基金（项目编号：11661161018、11927811、12004371、12150014、12205296、12274395）、青年创新促进会（项目编号：2023474）以及中国国家重点研发计划（项目编号：2018YFA0306600）的资助。Y.C. 获得 VILLUM FONDEN（项目编号：37766）、丹麦研究基金会以及欧盟 H2020 ERC 高级资助项目"黑洞：引力发现引擎"（资助协议编号：Gravitas–101052587）的资助，并获得葡萄牙科学与技术基金会 FCT（Fundaç˜ao para a Ciˆencia e Tecnologia I.P）的项目资助（项目编号：2022.01324.PTDC）。J.S. 获得北京大学启动经费（项目编号：7101302974）和中国国家自然科学基金（项目编号：12025507、12150015）的资助；并获得中国科学院（CAS）前沿科学重点研究计划（项目编号：ZDBS-LY-7003）及中国科学院青年基础研究科学家项目（YSBR-006）的资助。F.W.Y. 和 Y.Z. 获得美国能源部（项目编号：DESC0009959）的资助。

作者贡献。M.J. 设计了实验方案、分析了数据并撰写了手稿。T.Z.H. 和 D.D.H. 开展了搜索实验、分析了数据并撰写了手稿。Y.F.C. 和 F.W.Y. 分析了数据并撰写了手稿。T.H. 和 X.D.Y. 开展了搜索实验。J.S.、Y.Z. 和 X.H.P. 提出了实验概念，制定了实验方案，并对手稿进行了编辑。J.F.D. 参与了实验设计，并校对和编辑了手稿。所有作者均参与了讨论并审阅了手稿。

竞争利益。作者声明不存在竞争利益。