

Q 频段使用新颖耦合调谐结构搜索暗光子的谐波腔探测

Yue Yin,^{1,2,3} Runqi Kang,^{1,2,3} Man Jiao,^{4,5,*} and Xing Rong^{1,2,3,6,†}

¹Laboratory of Spin Magnetic Resonance, School of Physical Sciences,
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

²Anhui Province Key Laboratory of Scientific Instrument Development and Application,
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

³Hefei National Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230088, China

⁴Institute for Advanced Study in Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

⁵Institute of Quantum Sensing and School of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

⁶Zhejiang Key Laboratory of R&D and Application of Cutting-edge
Scientific Instruments, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China

实验室对暗物质的搜寻对于理解物理学和宇宙学中的若干基本难题至关重要。大多数基于空腔的 haloscope 搜索集中在 10 GHz 以下的频率范围,而更高频率的参数空间则由于微波空腔制造挑战较少被探索。在这里我们报告了首个使用 33.141 GHz 空腔的 Q 频段 haloscope 对暗光子进行搜寻。设计了一种与空腔分离的新颖耦合调谐结构,以避免降低空腔的质量因子。我们在 90 % 置信水平下,在从 33.139 GHz 到 33.143 GHz 的频率范围内建立了最严格的限制 $\chi < 2.5 \times 10^{-12}$,对应的暗光子质量范围为 137.05 μeV 至 137.07 μeV 。结果超过了之前的天文限制近三个数量级。这项工作证明了 Q 频段暗物质 haloscope 的可行性。未来,通过低温实验可以将限制进一步提高一个以上的数量级,并且装置可以扩展用于搜寻轴子、类轴子粒子和高频引力波。

许多天文观测表明暗物质 [1, 2] 的存在。人们普遍认为,暗物质占我们宇宙的 24%,远多于普通物质。暗物质也被认为在宇宙早期演化中发挥了重要作用 [3]。然而,尽管有来自引力效应的间接证据 [1, 2],暗物质的本质和特性仍然是一个谜。已经提出了许多暗物质候选者。其中,暗光子是其中一个最吸引人的候选者,因为它是由超越标准模型的许多理论提出的,并且可以帮助解释许多实验和天文异常现象,包括星系速度差异 [4] 和宇宙射线异常 [5, 6]。缪子反常磁矩 [7, 8] 和 W 玻色子质量异常 [9, 10] 也可以通过暗光子的存在来解释。

暗光子是一种源自标准模型规范群 [11–13] 中添加的新暗 U(1) 的自旋-1 玻色子。其与普通光子的耦合可以通过拉格朗日量来描述:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^2 - \frac{1}{4}V_{\mu\nu}^2 - \frac{m_{A'}^2}{2}A'_\mu A'^\mu + \frac{\chi}{2}F_{\mu\nu}V^{\mu\nu}, \quad (1)$$

其中 A_μ 和 A'_μ 是普通光子和暗光子的规范场, $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$ 和 $V_{\mu\nu} = \partial_\mu A'_\nu - \partial_\nu A'_\mu$ 是相应的场张量, $m_{A'}$ 是暗光子的质量,而 χ 是一个无量纲参数,描述普通光子和暗光子之间的动力学混合。 χ 和 $m_{A'}$ 都是自由参数。之前的计算表明,暗光子的质量范围从几 μeV 到几百 μeV [14, 15] 是很有希望的,而 χ 的值被认

为是非常小的。因此,寻找暗光子极具挑战性。

卤镜是寻找暗光子的一种最流行的方法 [16–18]。它基于银河系沉浸在密度为 $\rho_{A'} = 0.45 \text{ GeV}/\text{cm}^3$ [19] 的暗物质晕中的假设。通过使用金属或电介质仪器手动破坏平移不变性,暗光子可以连续转化为普通光子并被检测到。对于金属腔体,由暗光子场诱导的输出功率可以写为:

$$P_s(\nu) = 2\pi\nu_{A'}\rho_{A'}\chi^2VC\frac{Q_LQ_a}{Q_L+Q_a}\frac{\beta}{1+\beta}L(\nu,\nu_c,Q_L) \quad (2)$$

其中 $\nu_{A'} = m_{A'}/h$ 是暗光子场的频率, h 是普朗克常数, V 是腔体的体积和形状因子, $C = \langle \cos^2 \theta \rangle |\int dV \mathbf{E}|^2 / V \int dV E^2$ 是形状因子,其中 θ 是暗光子场的极化方向与电场之间的角度。 $Q_a = 10^6$ 是暗光子场的质量因子。 $Q_L = Q_0/(1+\beta)$ 是腔的加载因子,其中 Q_0 是固有品质因子, β 是腔和输出端口之间的耦合强度。 $L(\nu,\nu_c,Q_L) = [1 + 4Q_L^2(\nu/\nu_c - 1)^2]^{-1}$ 是洛伦兹线形,其中 ν_c 是腔的共振频率。共振检测由如 ORGAN[20], QUAX[21, 22], CAPP[23], HAYSTAC[24], ADMX[25, 26] 和 SHANHE[27] 等组织使用微波腔进行。像 FUNK[28], BREAD[29], DOSUE[30], QUALIPHIDE[31], BRASS-p[32], 原子磁力仪 [33] 和暗 SRF[34] 这样的实验通过非共振装置实现了对暗光

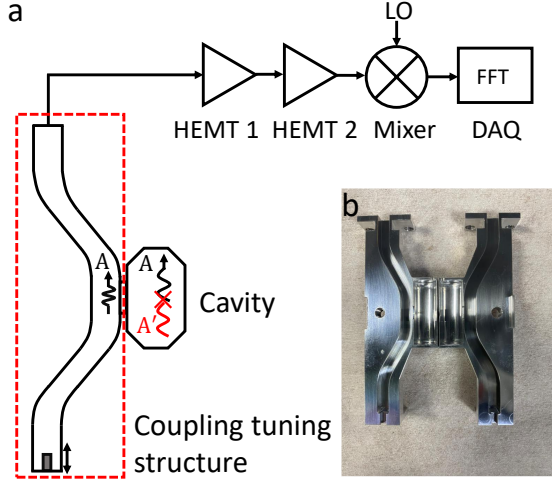


图 1. 实验设置的示意图。该设置由一个圆柱形腔体、一个弓形波导、一组 HEMTs（高电子迁移率晶体管）、一个混频器和一个 DAQ 系统组成。在波导的末端有一个可移动的金属块，用于调整腔体与波导之间的耦合强度。

子的大范围搜索。这些项目集中在频率低于 10 GHz 的范围内，对应的暗光子质量范围低于 $40\mu\text{eV}$ 。然而，尽管有强烈的动机，超过 $40\mu\text{eV}$ 质量的暗光子很少被探索。在高频率下搜索暗光子的主要挑战来自于频率-长度关系。由于暗光子的康普顿波长与频率成反比，谐振腔的有效体积随谐振频率 ν_c 以 ν_c^{-3} 的方式减小。结果，在高频时，由暗光子诱导的信号会非常微弱，并且制造这些腔体将变得困难。最近，MADMAX 团队引入了介电腔来搜索大约 19 GHz[35] 附近的暗光子。ORGAN 小组使用高频金属腔在从 26 GHz 到 27 GHz[20] 的范围内搜索暗光子以及轴子。同时，对于高于 30 GHz 的频段研究仍然不足。

本文报道了第一个 Q 波段半轴子实验。采用了一个谐振频率为 33.141 GHz 的金属腔，对应于暗光子质量为 $137.06\mu\text{eV}$ 。设计了一种与腔体分离的新型耦合调谐结构，以实现耦合调谐，而不会降低腔体的品质因数。这项工作在 $137.06\mu\text{eV}$ 附近，质量范围为 16.5 neV 时，对暗光子的约束达到了 2.5×10^{-12} 级别，超过了之前的结果近三个数量级。

图 1 展示了实验装置的示意图。该装置置于室温下。装置由一个圆柱形空腔、一根传输波导、一组高电子迁移率晶体管 (HEMT) 放大器、一个混频器和一个数据采集系统 (DAQ) 组成。空腔为圆柱形，直径 3.56 毫米，长度 20.00 毫米。由于方程 1 中的拉格朗日允

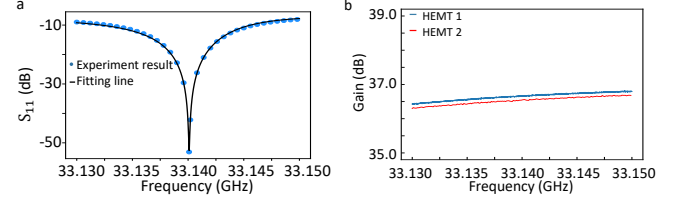


图 2. 校准结果。(a) 腔体的反射系数。蓝色点是实验结果，黑色线是拟合结果。(b) 第一个 HEMT（蓝色）和第二个 HEMT（红色）的增益曲线。

许暗光子与普通光子之间的自发转换，因此该空腔能够收集由暗光子转换而来的微波光子，并将其馈入读出电路。只有具有非零形状因子的空腔模式才能被暗光子场激发。在这项工作中利用了形状因子为 0.23 的 TM_{010} 模式。

耦合调谐结构是必要的，因为根据公式 2，信号功率在临界耦合时即 $\beta = 1$ 达到最大。由于腔体较小且制造困难，在腔体内任何耦合调谐结构都会极大地降低其品质因数。因此设计了一个弓形波导来将暗光子引起的微波功率耦合到读出链路中。该波导的横截面是一个 7.1 毫米 $\times$ 3.6 毫米的矩形。在波导的一端有一个可移动的金属块。由于金属块的位置可以决定波导内微波节点和反节点的位置，通过移动金属块可以调整腔体与波导之间的耦合强度。暗光子引起的微波信号会通过波导到同轴适配器从波导另一端输入读出链路。该信号首先被 HEMTs 放大，然后下变频至大约 2 兆赫兹，并最终由 DAQ 收集。DAQ 可以执行快速傅里叶变换并以 100% 占空比 [36, 37] 保存频率谱。

为了确定腔体的谐振频率 ν_c 、加载品质因子 Q_L 和耦合强度 β ，测量了输出端口 S_{11} 的反射系数，如图 2(a) 所示。结果拟合到方程 [38]：

$$S_{11} = 20 \log_{10} \left| \alpha \left(1 - \frac{2\beta/(1 + \beta e^{i\phi})}{1 + 2iQ_L(\nu/\nu_c - 1)} \right) \right|, \quad (3)$$

其中， α 是传输过程中的功率损耗，而 ϕ 描述了阻抗失配，这使得频谱不对称。通过移动金属块体，我们接近了临界耦合与 $\beta = 1.0243 \pm 0.0007$ 。腔的谐振频率和品质因子分别为 $\nu_c = 3.3141 \times 10^1 \pm 1.1228 \times 10^{-5}$ GHz 和 $Q_L = 2520 \pm 5$ 。

噪声功率可以通过以下方程描述：

$$P_t = G_1 G_2 P_{n,1} + G_2 P_{n,2} + P_{n,3}, \quad (4)$$

其中, P_t 是总噪声功率, $P_{n,1}, P_{n,2}, P_{n,3}$ 分别是第一 HEMT、第二 HEMT 和 DAQ 系统的噪声功率, 而 $G_{1,2}$ 分别表示第一和第二 HEMT 的增益。通常情况下, HEMTs 的增益足够大, 使得总的噪声主要由第一个 HEMT 的噪声决定。图 2 (b) 显示了 HEMT 1 (蓝线) 和 HEMT 2 (红线) 的增益曲线。在 33.130 GHz 到 33.150 GHz 的频率范围内, HEMT 1 和 HEMT 2 的增益范围分别是 36.42 dB~36.79 dB 和 36.29 dB~36.68 dB。

暗光子搜索实验持续了 12 小时, 产生了两万个原始谱线。尽管当频率间隔宽度 B 等于暗光子场的线宽 $\Delta\nu = 33.141$ kHz 时信号噪声比会被优化, 在实验中 B 被设置为 477 赫兹, 从而使一个暗光子信号由大约 70 个点组成并通过其线形进一步验证。原始谱线经过了一个粗略处理过程, 每 1000 个相邻的谱线被分为一组并平均成单个功率谱。图 3 (a) 中的蓝点显示了第一组的平均功率谱 P_n 。曲线基线是由于读出线路传输效率的变化引起的。由于只关心功率过剩而非噪声功率本身, SG 滤波器 P^{SG} 被应用于每个平均光谱 [39], 如图 3(a) 中的黑线所示。由于暗光子信号的强度依赖于其中心频率, 功率过剩通过以下方程重新缩放为预期的暗光子信号 $\chi = 1$:

$$\Delta_r = \frac{P_n - P^{SG}}{P_{DP}(\nu, \chi = 1)}, \quad (5)$$

其中 Δ_r 是重新缩放后的功率过剩, $P_{DP}(\nu, \chi = 1)$ 是带有 $\chi = 1$ 的暗光子信号。第一子集的重新缩放后的功率过剩及其相应的标准偏差分别如图 3(b) 中的蓝色点和粉色带所示。在此我们将暗光子候选信号的阈值设定为标准差的 5 倍。由于没有观察到超过标准差 5 倍的归一化功率过剩, 因此可以从我们的结果中排除暗光子与普通光子之间的动能混合。由于光谱的频率间隔仅为暗光子线宽的 1/70, 信噪比会下降 $\sqrt{70}$ 倍。为了恢复信噪比, 对重新缩放后的功率过剩光谱 [40] 应用了卷积积分, 其核为归一化的暗光子线形。图 3(c) 显示了第一子集的卷积功率过剩。如图 3(c) 所示, 蓝色点表示卷积后的功率过剩 Δ_f , 粉色带代表标准偏差 $\sigma_{f\phi}$ 。

所有卷积后的光谱再次被平均以进一步抑制噪声, 如图 3(d) 所示。平均功率过剩 Δ_c 用蓝色点表示, 统计误差 σ_c 用粉色带表示。此处, 系统误差被引入分析中。实验参数的均值和相对

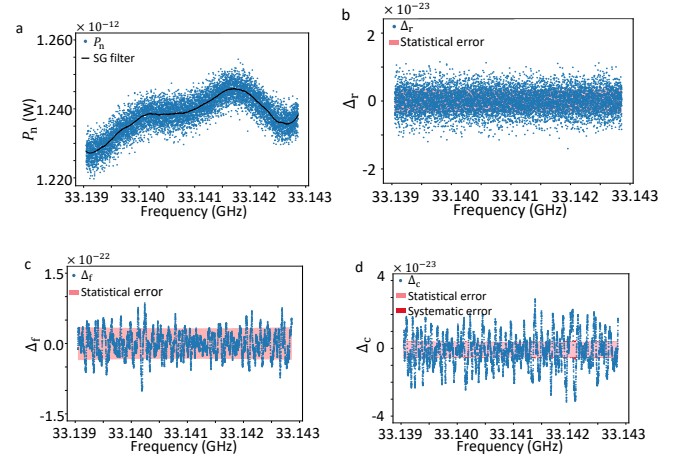


图 3. 实验结果。(a) 第一个子集的噪声功率谱 (蓝色点) 和 SG 滤波器 (黑色线)。(b) 第一个子集的重新缩放后的功率过剩 (蓝色点) 和统计误差 (粉色带)。(c) 第一个子集的卷积功率过剩 (蓝色点) 和统计误差 (粉色带)。(d) 从所有子集中获得的平均功率过剩 (蓝色点)、统计误差 (粉色带) 和系统误差 (红色带)。

不确定度列于表 I 中。统计误差与系统误差结合为 $\sigma'_c = \sqrt{\sigma_c^2 + \Delta_c^2(\sigma_{Q_L}^2 + \sigma_\beta^2 + \sigma_{\nu_c}^2 + \sigma_V^2)}$, 其中 $\sigma_{Q_L}, \sigma_\beta, \sigma_{\nu_c}, \sigma_V$ 分别是 Q_L, β, ν_c, V 的相对不确定度。系统误差的贡献如图 3(d) 中的红色带所示。

参数	值	相对不确定度
Q_L	2.5×10^3	1.9×10^{-3}
β	1.0	6.8×10^{-4}
ν_c	33.1 GHz	3.6×10^{-7}
V	$7.3 \times 10^{-4} \text{ L}$	6.4×10^{-2}

表 I. 参数及其相对不确定性的值。

动能混合 χ 的约束可以根据图 3(d) 中获得的 Δ_c 和 σ_c 通过求解方程得到:

$$\int_0^{\chi_{90\%}} p(\chi^2 | \Delta_c) d\chi^2 = 90\%, \quad (6)$$

其中, $\chi_{90\%}$ 是置信水平为 90% 的动能混合约束, 而 χ^2 的条件分布是

$$p(\chi^2 | \Delta_c) = \frac{\exp\left(-\frac{(\Delta_c - \chi^2)^2}{2\sigma_c^2}\right)}{\int_0^\infty \exp\left(-\frac{(\Delta_c - \chi^2)^2}{2\sigma_c^2}\right) d\chi^2}. \quad (7)$$

在中心频率 33.141 GHz 下, 利用 $\Delta_c = -7.3 \times 10^{-24}$ 和 $\sigma_c = 3.7 \times 10^{-24}$, 我们得到了动能混合 $\chi < 2.1 \times$

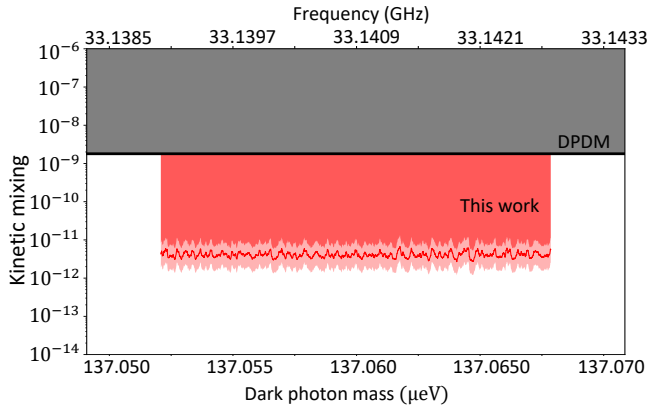


图 4. 暗光子和普通光子之间的动能混杂的限制。红线指的是随机偏振场景中动能混杂的上限。浅色和深红色区域分别指在线性偏振场景下最好和最坏条件下的被排除参数空间。灰色区域指结果 DPDM[41]。

10^{-12} 的约束。通过采用对平均功率过剩光谱中的每个频率区间进行计算的方法,可以得到从 33.139 GHz 到 33.143 GHz 频段范围内的动能混杂约束。图 4 中的红线显示了在假设随机偏振场景下的动能混杂约束,在此场景中,暗光子的偏振均匀分布在所有方向上。结果比 DPDM[41] 提供的约束严格近三个数量级。

对于线性偏振情形,形式因子是

$$C = \frac{|\int dV \mathbf{E}|^2}{V \int dV E^2} \langle (\mathbf{Z}(\mathbf{t}) \cdot \mathbf{X})^2 \rangle, \quad (8)$$

其中 $\mathbf{Z}(\mathbf{t}) = (\cos \lambda_{\text{lab}} \cos \omega_0 t, \cos \lambda_{\text{lab}} \sin \omega_0 t, \sin \lambda_{\text{lab}})$ 和 $\mathbf{X} = (\sin \theta_{\text{DP}} \cos \phi_{\text{DP}}, \sin \theta_{\text{DP}} \sin \phi_{\text{DP}}, \cos \theta_{\text{DP}})$, λ_{lab} 是我们实验室的纬度,而 ω_0 是地球自转的角频率[42]。因此,与随机偏振情形相比,在线性偏振情形下的约束条件将被一个因子 $\varepsilon = (3\langle (\mathbf{Z}(\mathbf{t}) \cdot \mathbf{X})^2 \rangle)^{-1/2}$ 修改。由于暗光子的极化方向未知,我们遍历了 $(\theta_{\text{DP}}, \phi_{\text{DP}})$ 的所有参数空间,并发现在实验室进行 12 小时实验时,因子 ε 的范围是 (0.74, 3.26)。如果在实验中极化方向几乎与实验室框架的 z 方向平行,则可以获得最佳限制,如图 4 中浅红色区域所示。相反,如果暗光子的极化方向几乎垂直于实验室框架的 z 方向,则会获得最差限制,如深红色区域所示。

总之,我们报告了首次在 Q 波段搜索暗光子暗物质的卤素腔实验。设计并制造了一个 33.141 GHz 的谐振腔。通过一种与谐振腔分离的新颖耦合机制,实现了不降低谐振腔品质因子的可调耦合。在从 33.139 到 33.143 GHz 的频率范围内,即暗光子质量范围从

137.052 μeV 到 137.067 μeV , 我们建立了最严格的动量混合约束。我们的结果超越了之前的约束近三个数量级。通过使用噪声温度更低的微波放大器和模式体积更大的谐振腔,这些约束可以进一步改进。我们的工作证明了在 30 GHz 以上区域进行暗物质卤素腔实验的可行性,并且可以进一步扩展以搜索高频引力波和其他有动机的暗物质候选物,包括轴子和类似轴子的粒子。

这项工作得到了国家自然科学基金 (T2388102, 12205290, 12261160569)、量子科学和技术创新计划 (2021ZD0302200) 和国家重点研发计划 (资助号 2021YFB3202800) 的支持。X.R. 感谢中国科学技术大学重大前沿研究项目 (资助号 LS9990000002) 的支持。Y. Y. 和 R. Q. K. 对这项工作做出了同等贡献。

* man.jiao@zju.edu.cn

† xrong@ustc.edu.cn

- [1] D. Clowe, A. Gonzalez, and M. Markevitch, Weak-Lensing Mass Reconstruction of the Interacting Cluster 1E 0657-558: Direct Evidence for the Existence of Dark Matter. *Astrophysical Journal - ASTROPHYS J* **604**, 596-603, 2004.
- [2] W. Tucker, *et al.*, 1E 0657-56: A Contender for the Hottest Known Cluster of Galaxies. *The Astrophysical Journal Letters* **496**, L5, 2009.
- [3] M. Kuster, G. Raffelt, and B. Beltrán, *Axions: Theory, cosmology, and experimental searches*. Springer Science & Business Media.
- [4] F. Zwicky, *et al.*, The redshift of extragalactic nebulae. *Helv. Phys. Acta* **6** (110), 138, 1933.
- [5] J. Chang, *et al.*, An excess of cosmic ray electrons at energies of 300–800 GeV. *Nature* **456**, 362-5, 2008.
- [6] I. Cholis, *et al.*, High energy positrons from annihilating dark matter. *Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology* **80** (12), 123511, 2009.
- [7] B. Abi, *et al.*, Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm. *Physical Review Letters* **126**, 2021.
- [8] C. Cazzaniga, *et al.*, Probing the explanation of the muon (g-2) anomaly and thermal light dark matter with the semi-visible dark photon channel. *The European Physical Journal C* **81**, 2021.
- [9] T. Aaltonen, *et al.*, High-precision measurement of the

- W boson mass with the CDF II detector. *Science (New York, N.Y.)* **376** , 170-176 , 2022.
- [10] A. Thomas and X. Wang, Constraints on the dark photon from parity violation and the W mass. *Physical Review D* **106** , 2022.
- [11] P. Galison and A. Manohar, Two Z's or not two Z's?. *Physics Letters B* **136** (4) , 279–283 , 1984.
- [12] B. Holdom, Two U(1)'s and ϵ charge shifts. *Physics Letters B* **166** (2) , 196–198 , 1986.
- [13] B. Holdom, Searching for ϵ charges and a new U(1). *Physics Letters B* **178** , 65-70 , 1986.
- [14] S. Borsányi, *et al.*, Calculation of the axion mass based on high-temperature lattice quantum chromodynamics. *Nature* **539** (7627) , 69–71 , 2016.
- [15] M. Kawasaki, K. Saikawa, and T. Sekiguchi, Axion dark matter from topological defects. *Physical Review D* **91** (6) , 065014 , 2015.
- [16] P. Sikivie, Experimental tests of the” invisible” axion. *Physical Review Letters* **51** (16) , 1415 , 1983.
- [17] P. Sikivie, Detection rates for 'invisible'-axion searches. *Physical Review D* **32** (11) , 2988 , 1985.
- [18] A. Caputo, *et al.*, Dark photon limits: A handbook. *Physical Review D* **104** (9) , 095029 , 2021.
- [19] J. Read, The local dark matter density. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* **41** , 2014.
- [20] A. Quiskamp, *et al.*, Exclusion of axionlike-particle co-genesis dark matter in a mass window above 100 μ eV. *Physical Review Letters* **132** (3) , 031601 , 2024.
- [21] D. Alesini, *et al.*, Search for invisible axion dark matter of mass $m_a=43 \mu\text{eV}$ with the QUAX- $\alpha\gamma$ experiment. *Phys. Rev. D* **103** , 102004 , 2021.
- [22] D. Alesini, *et al.*, Search for Galactic axions with a high-Q dielectric cavity. *Physical Review D* **106** (5) , 052007 , 2022.
- [23] Y. Kim, *et al.*, Experimental Search for Invisible Dark Matter Axions around 22 μ eV. *Physical Review Letters* **133** (5) , 051802 , 2024.
- [24] X. Bai, *et al.*, Dark Matter Axion Search with HAYSTAC Phase II. *arXiv preprint arXiv:2409.08998* , 2024.
- [25] C. Bartram, *et al.*, Search for invisible axion dark matter in the 3.3–4.2 μ eV mass range. *Physical review letters* **127** (26) , 261803 , 2021.
- [26] R. Cervantes, *et al.*, Search for 70 μ eV dark photon dark matter with a dielectrically loaded multiwavelength microwave cavity. *Physical Review Letters* **129** (20) , 201301 , 2022.
- [27] Z. Tang, *et al.*, First scan search for dark photon dark matter with a tunable superconducting radio-frequency cavity. *Physical Review Letters* **133** (2) , 021005 , 2024.
- [28] A. Andrianavalomahefa, *et al.*, Limits from the FUNK experiment on the mixing strength of hidden-photon dark matter in the visible and near-ultraviolet wavelength range. *Physical Review D* **102** (4) , 042001 , 2020.
- [29] J. Liu, *et al.*, Broadband solenoidal haloscope for terahertz axion detection. *Physical Review Letters* **128** (13) , 131801 , 2022.
- [30] S. Kotaka, *et al.*, Search for dark photon dark matter in the mass range 74–110 μ eV with a cryogenic millimeter-wave receiver. *Physical Review Letters* **130** (7) , 071805 , 2023.
- [31] K. Ramanathan, *et al.*, Wideband direct detection constraints on hidden photon dark matter with the QUALIPHIDE experiment. *Physical Review Letters* **130** (23) , 231001 , 2023.
- [32] F. Bajjali, *et al.*, First results from BRASS-p broadband searches for hidden photon dark matter. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2023** (08) , 077 , 2023.
- [33] M. Jiang, *et al.*, Long-baseline quantum sensor network as dark matter haloscope. *Nature communications* **15** (1) , 3331 , 2024.
- [34] A. Romanenko, *et al.*, Search for dark photons with superconducting radio frequency cavities. *Physical review letters* **130** (26) , 261801 , 2023.
- [35] B. Garcia, *et al.*, First search for axion dark matter with a Madmax prototype. *arXiv preprint arXiv:2409.11777* , 2024.
- [36] R. Kang, *et al.*, Near-quantum-limited haloscope search for dark-photon dark matter enhanced by a high-Q superconducting cavity. *Physical Review D* **109** (9) , 095037 , 2024.
- [37] Y. Tong, Yu, *et al.*, A high performance fast-Fourier-transform spectrum analyzer for measuring spin noise spectrums. *Chinese Physics B* **29** (9) , 090704 , 2020.
- [38] M. Kudra, *et al.*, High quality three-dimensional aluminum microwave cavities. *Applied Physics Letters* **117** (7) , 2020.
- [39] B. M. Brubaker, *et al.*, HAYSTAC axion search analysis procedure. *Phys. Rev. D* **96** , 123008 , 2017.
- [40] R. Cervantes, *et al.*, ADMX-Orpheus first search for 70 μ eV dark photon dark matter: Detailed design, operations, and analysis. *Physical Review D* **106** (10) , 102002 , 2022.
- [41] P. Arias, *et al.*, WISPy cold dark matter. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2012** (06) , 013 , 2012.

- [42] A. Caputo, *et al.*, Dark photon limits: A handbook. [Phys. Rev. D **104** , 095029 , 2021.](#)