

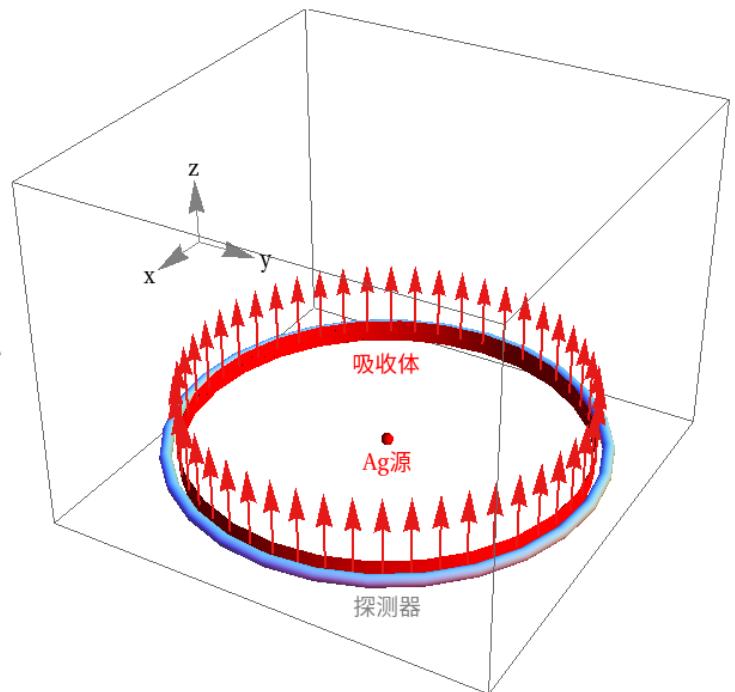
静态核共振精密探测：暗物质

高宇

基于以下论文：

- (1) [Sci.Bull. 69 \(2024\) 18, 2795-2798](#)
- (2) [2512.18960](#), Peng-Long Zhang(张朋龙), Yu-Ming Yang(杨玉明), Xiao-Jun Bi(毕效军), Qin Chang(常钦), Yu Gao(高宇), Hai-Bo Li(李海波), Wei Xu(徐伟), and Peng-Fei Yin(殷鹏飞)

高能所
2026/01/28



“波动”型冷暗物质

- 早期宇宙产生，占现宇宙总能量密度27%
- 极低质量玻色子具有宏观粒子波长、宏观波动性
- 典型代表：轴子 (Peccei & Quinn, 77')、类轴子场、低质量标量场等
- 实验室本地可视为经典场

$$a_{\text{eff}}(\vec{x}, t) = \frac{\sqrt{2\rho_{\text{DM}}}}{m_a} \sin[-\omega t + \phi_{\text{eff}, k}(t)]$$

多模式叠加后仍具有良好的单色性 $\sigma_\omega = 10^{-6}\omega$ 、在相干时标 $\tau_c \sim 10^6 f^{-1}$ 内可视为良好的低速相干平面波、通过与标准模型耦合产生可观测效应。

原子(核)能级受标量暗物质场的调制

“原子钟A、B之间的频率比可参数化为精细耦合常数(α)、电子-质子质量比(m_e/m_p)、夸克质量(m_q)比以及色动力学能标(Λ_{QCD})”。

暗物质场可通过调制核能级的关键参数，周期性调制A、B两处的能级差。

对于标量场，低能有效拉式量可采用与电磁场、夸克、胶子场耦合的形式：

$$\mathcal{L} \supset y_q \phi \bar{q}q + \frac{\phi}{f_\gamma} F_{\mu\nu}^2 + \frac{\phi}{f_g} G_{\mu\nu}^2$$

近期研究见Gratta, Kaplan, Rajendran, 20[’] 及相关引用

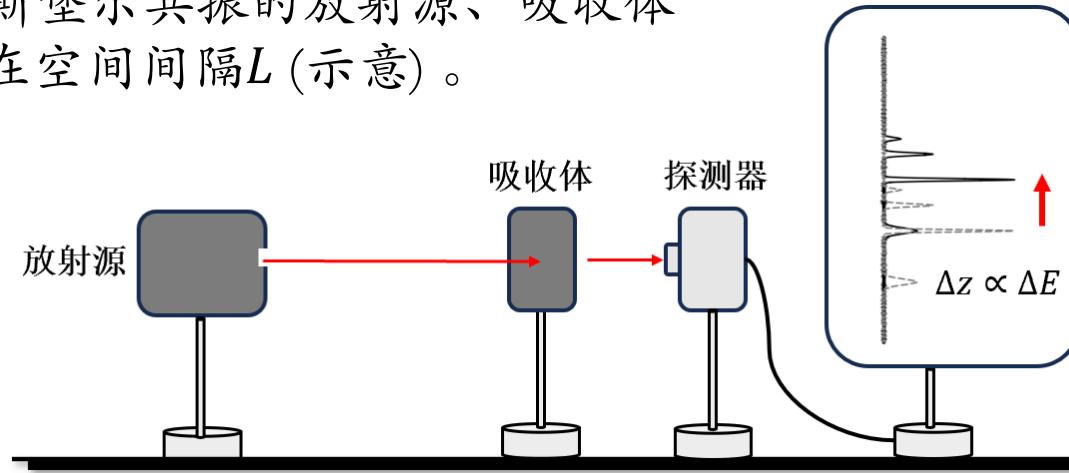
有效能级差取决于A、B两点之间的暗物质场强差*

$$\Delta E \simeq -\frac{Z\alpha^2}{A^{1/3}r_0} \frac{\Delta\phi}{f_\gamma} \quad \Delta E \simeq 2.5 y_d \Delta\phi \quad \Delta E \simeq 0.08 \text{ GeV} \frac{\Delta\phi}{f_g}$$

*受对称性影响，赝标量场的耦合为二阶。

静态共振方案中的暗物质能级修正

^{109}Ag 穆斯堡尔共振的放射源、吸收体之间存在空间间隔 L (示意)。



参见：现代物理知识，2025, 37卷，4期: 43-48页

能级修正差取决于光子发射、吸收处时空点的暗物质场强差异

$$\begin{aligned}\Delta E &= \kappa\phi(t + L, \vec{L}) - \kappa\phi(t, \vec{0}) \\ &= \kappa \frac{\sqrt{2\rho_{\text{DM}}}}{m_\phi} \cos \left(\omega_\phi(t + L) - m_\phi \vec{\beta} \cdot \vec{L} \right) - \kappa \frac{\sqrt{2\rho_{\text{DM}}}}{m_\phi} \cos \left(\omega_\phi t - m_\phi \vec{\beta} \cdot \vec{0} \right) \\ &= -2\kappa \frac{\sqrt{2\rho_{\text{DM}}}}{m_\phi} \sin \left(\frac{m_\phi L(1 - \beta)}{2} \right) \sin \left(m_\phi \left[t + \frac{L(1 - \beta)}{2} \right] \right).\end{aligned}$$

$$\Delta E = -2\kappa \frac{\sqrt{2\rho_{\text{DM}}}}{m_\phi} \sin\left(\frac{m_\phi L(1-\beta)}{2}\right) \sin\left(m_\phi \left[t + \frac{L(1-\beta)}{2}\right]\right)$$

信号振幅

频率

相位

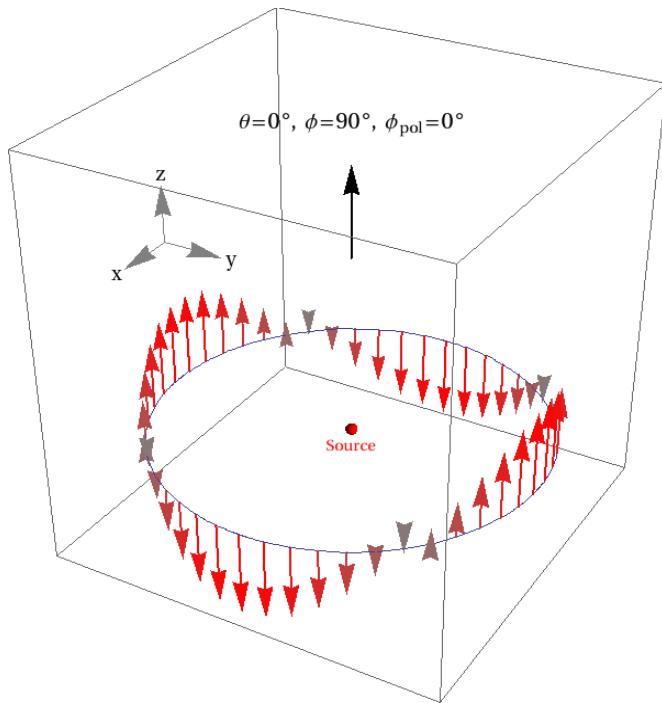
时间项主导：

地球附近的暗物质处于非相对论速度($\beta \ll 1$)：光子飞行时间差产生的暗物质场相位差远大于空间间隔相较暗物质场波长的相位差。

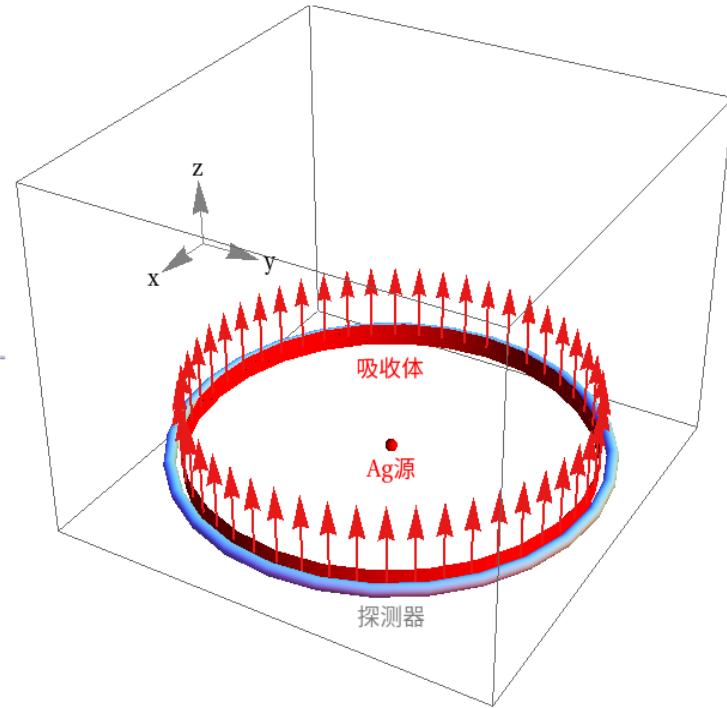
1. 与放射源等距离时，环带上各方向修正相同
2. 长波极限($L \ll \lambda_D$)下，信号大小正比於间距

与引力波信号振幅在空间形态上有显著区别

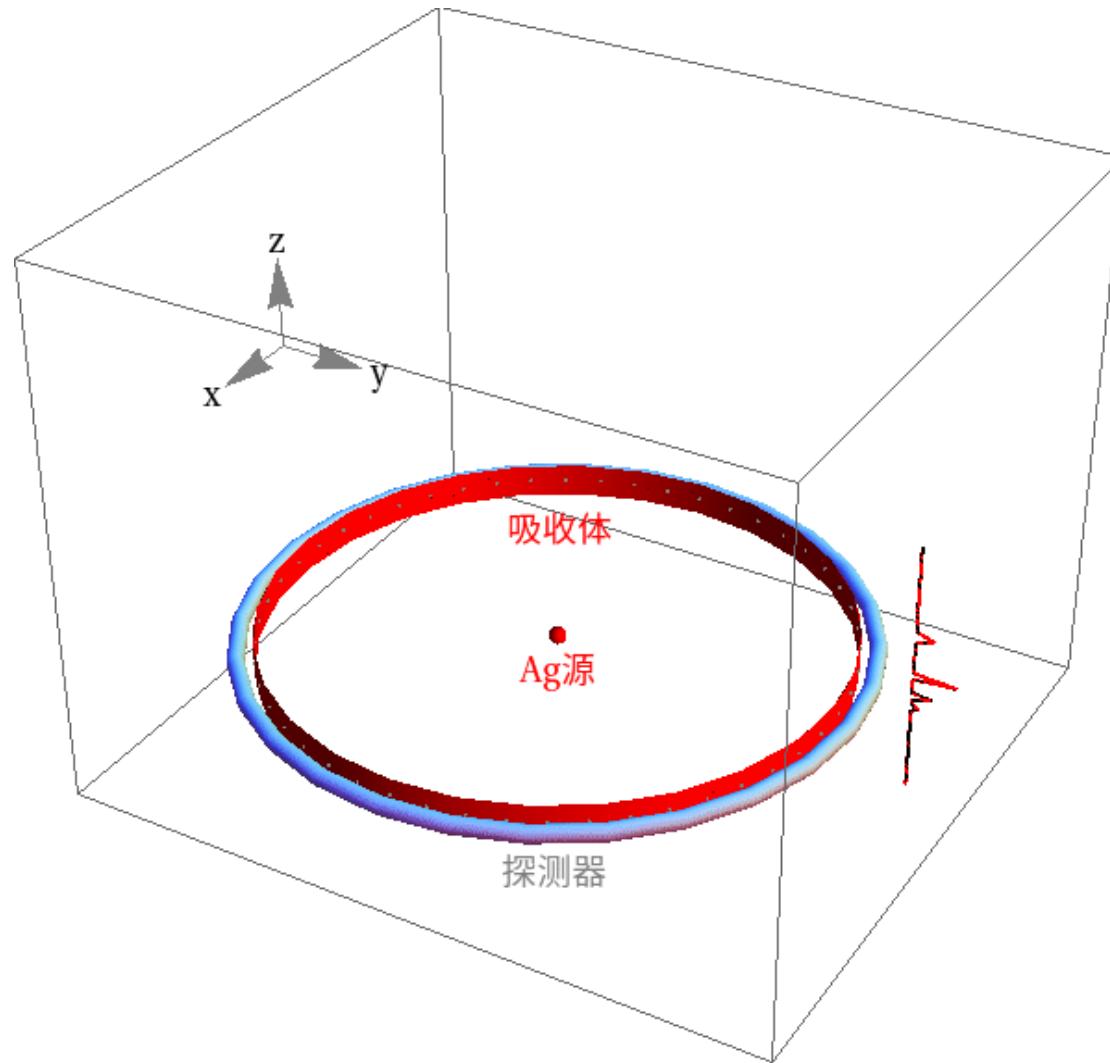
引力波信号有明显的方向分布



暗物质信号每处强度几乎相同



暗物质信号各方向上同起同落 (GIF)



能量分辨取决于引力红移下吸收峰空间测量精度

静态测量方案中，引力场频移代替多普勒频移，高度差代替速度差。

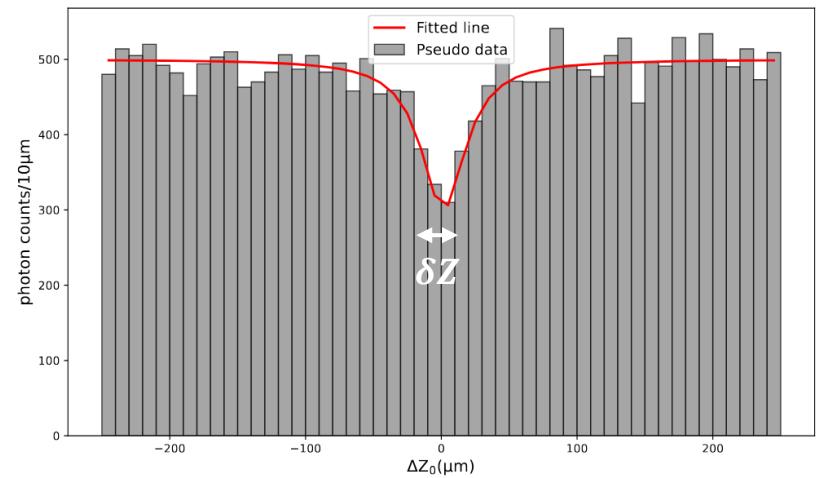
Gao, Xu, Zhang, 24'

$$C(Z) = \dot{N}_0 e^{-\mu_e t'} \cdot \left[(1 - f_S) + \int_{-\infty}^{\infty} f_S \xi(Z_S, E_0) \cdot e^{-t \xi(Z, E_0 + \Delta E_0) \Gamma / 2\pi} dE \right],$$
$$\xi(Z, E_0) \equiv \frac{\Gamma / 2\pi}{[E - g(Z - Z_S)E - E_0]^2 + (\Gamma / 2)^2}.$$

探测器上吸收峰中心位置随能量调整产生漂移，空间分辨 δZ 取决于共振峰形态和统计量。

$$Z_0 \rightarrow Z_0(t) = Z_0 + g^{-1} \frac{\Delta f(t)}{f_\gamma}$$

光子数要求： $N_\gamma \geq \left(\frac{3\sigma}{\epsilon f_S} \right)^2$



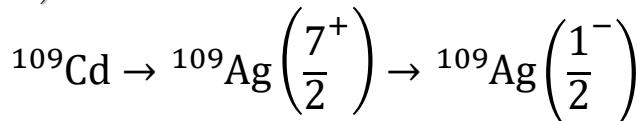
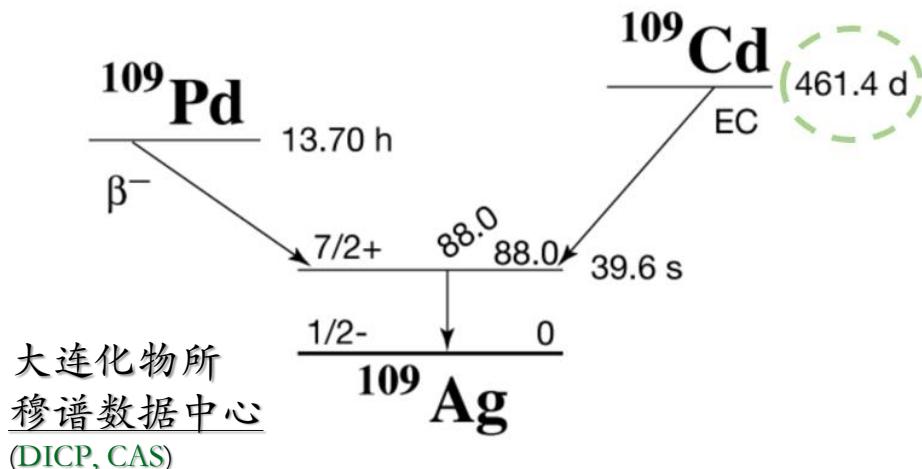
同位素选取的关键属性：

- * 极窄的穆斯堡尔共振峰宽 $\Gamma \propto \tau^{-1}$
- * 较长的母粒子寿命
- * 良好的分支比
- * 易于获取

[2512.18960](#)

Isotope	Nuclear transition energy E_0 (keV)	Natural Width Γ_0 (eV)	Γ_0/E_0	Lifetime	Γ_{exp} (eV)	Parent lifetime (day)
^{109}Ag	88	2.3×10^{-17}	1.2×10^{-22}	27.6 s	1.9×10^{-16}	461 (^{109}Cd)
^{45}Sc	12.4	1.4×10^{-15}	1.1×10^{-19}	0.47 s	7.0×10^{-13} [32]	163 (^{45}Ca)*
^{67}Zn	93.3	5.0×10^{-11}	5.4×10^{-16}	$6.4 \mu\text{s}$	7.5×10^{-11} [33]	3.3 (^{67}Ga)

Decay Diagram



^{109}Ag 是“百里挑一”的严选核素：

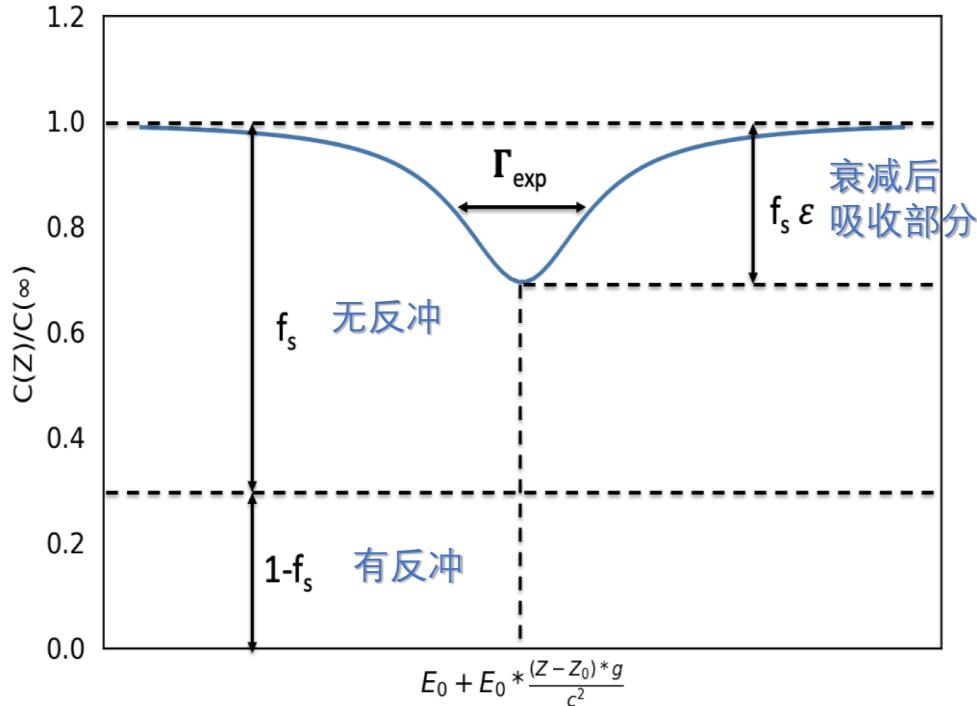
10⁻²² 极窄线宽
100% 分支比
 ^{109}Ag ~51% 自然丰度

^{45}Sc 的线宽、母粒子寿命皆优于 ^{67}Zn ，但母粒子向激发态的衰变分支比低。

$$N_{total} = A \times P_\gamma \times f_{BR} \times \Delta t \times N_{exp} \times f_\theta$$

光子到达数量 源辐射率 光子占比 分支比 曝光时间 相干重复率 角覆盖率

各向同性衰变源的角覆盖率 $\sim 2\pi \cdot (\text{共振峰宽对应高度差}) / (\text{间距})$



Isotope	α_T	P_γ	f_{BR}	f_s
¹⁰⁹ Ag	26.3	0.037	1	0.05
⁴⁵ Sc	423	0.0024	2×10^{-5}	0.75
⁶⁷ Zn	0.873	0.534	0.52	0.2

几种元素的内转化率、对应光子占比、光子分支比以及无反冲率的比较。

波动型暗物质一般具有较高的相干周期数： $N_{exp} \sim 10^6$ 。

以及：X射线光源情况

近期⁴⁵Sc成功实现了激发与共振吸收

参见 [Nature](#) Vol 622, pages 471 – 475 (2023)

光源直接激发原子核，向基态跃迁过程可发生穆斯堡尔共振。

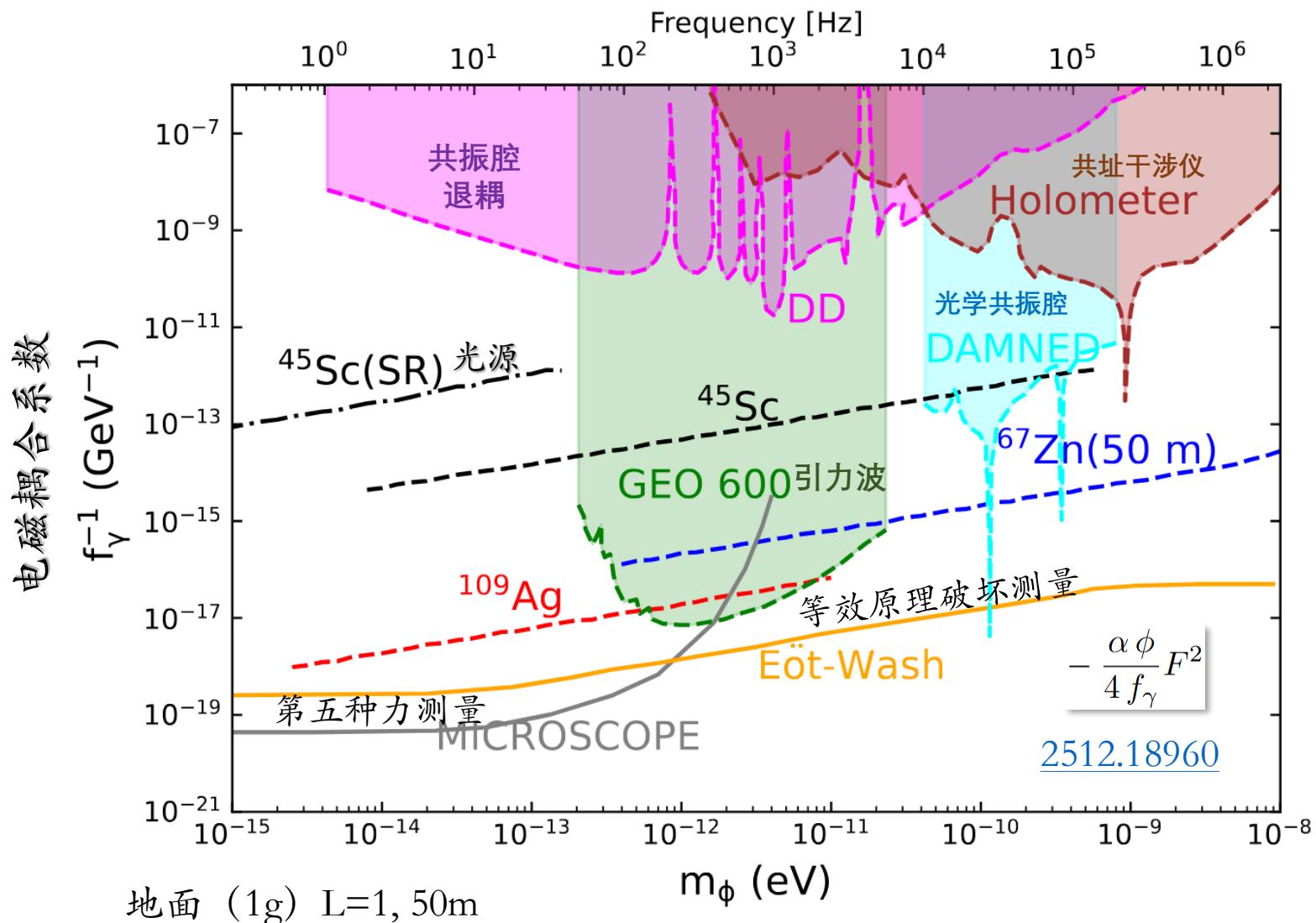
定性的穆斯堡尔光子数估算：

$$N_{\gamma}^{\text{MS}} = N_{\gamma}^{\text{SR}} \frac{\Gamma}{\Delta E^{\text{SR}}} \quad \text{XFEL的特征频宽取} \Delta E \sim 0.1 \text{ MeV}$$

到达探测器的穆斯堡尔光子光子数

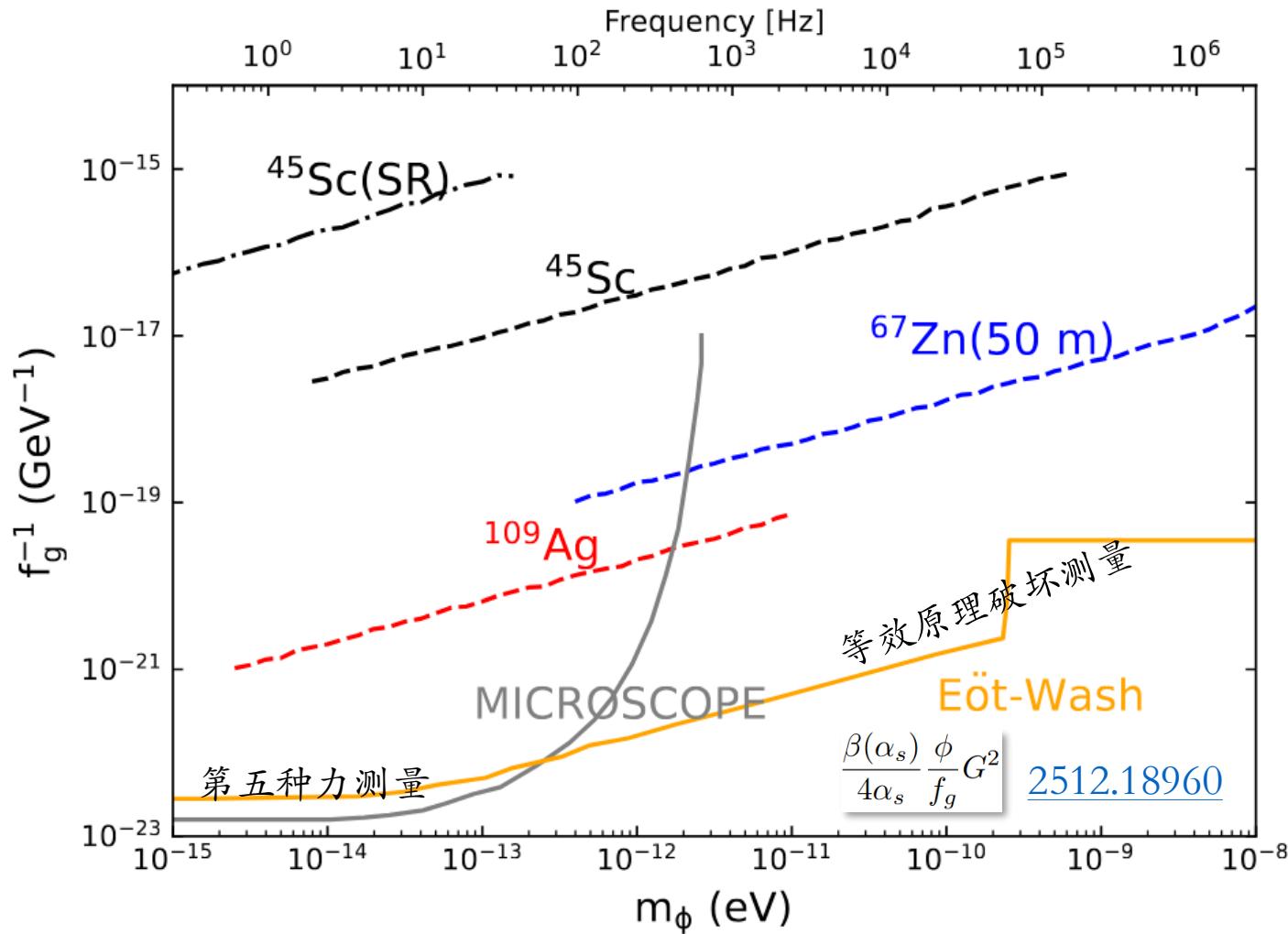
$$N_{\gamma} = N_{\gamma}^{\text{MS}} \times P_{\gamma} \times \Delta t \times N_{\text{exp}}$$

定向性：激发-辐射的穆斯堡尔光子倾向于前向辐射，假设O(1)角覆盖



高频截断: 源强度 (0.1Ci放射源或 $10^{12} \text{ s}^{-1} \text{ meV}^{-1}$ 光源) 对应的统计量限制
 低频阶段: 暗物质 10^6 周期不超过放射源寿命/合理观测时间
 曝光时间: 一倍的暗物质的相干时间 (10⁶周期) (*1/3)

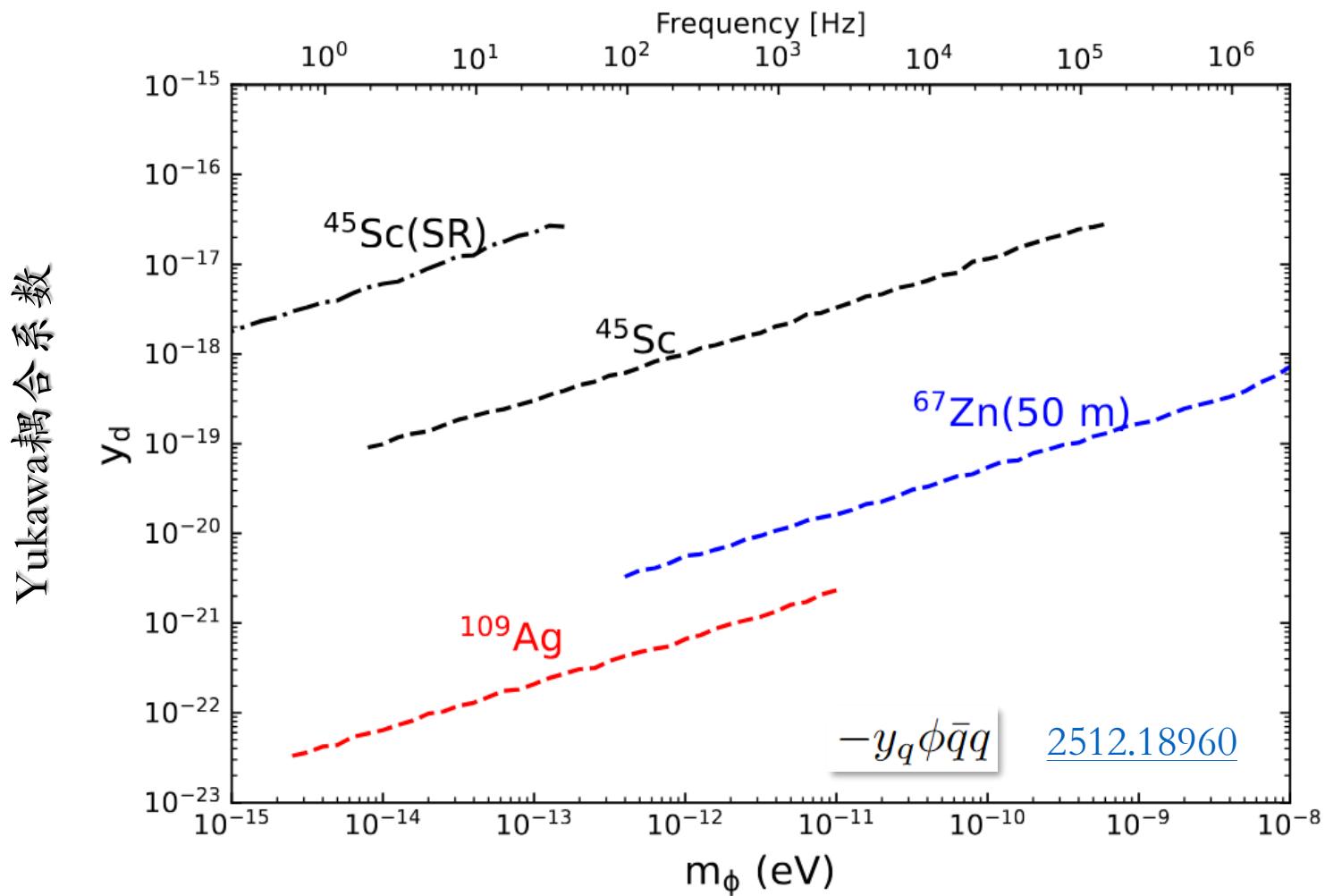
胶子耦合系数



高频截断：源强度（0.1Ci放射源或 $10^{12} \text{ s}^{-1} \text{ meV}^{-1}$ 光源）对应的统计量限制

低频阶段：暗物质 10^6 周期不超过放射源寿命/合理观测时间

曝光时间：一倍的暗物质的相干时间（ 10^6 周期）(*1/3)



高频截断：源强度（0.1Ci放射源或 $10^{12} \text{ s}^{-1} \text{ meV}^{-1}$ 光源）对应的统计量限制

低频阶段：暗物质 10^6 周期不超过放射源寿命/合理观测时间

曝光时间：一倍的暗物质的相干时间（ 10^6 周期）(*1/3)

小结

- 波动性暗物质场可调制核能级，产生可观测的光子频率差。
- 核共振的高灵敏度提供一个绝佳的探测方法。
- 在很宽的质量范围 (10^{-15} - 10^{-8} eV) 内对波动性暗物质场与电磁、胶子、夸克的多种有效耦合系数有很强的灵敏度预期。
- 相较偶发或随机的引力波，波动暗物质具有典型的单色性，有利于统计量累积。
- 信号形态上可与引力波信号区分开。
- Ag之外更多的可候选同位素：Zn、Ge、Sc等，与高亮度光源有更多结合的可能性。