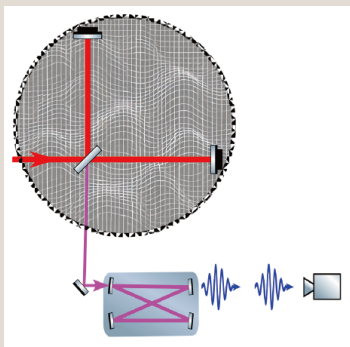


寻找量子引力的新策略

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Michael Schirber. *Physics*, February 14, 2025)

量子引力理论试图将引力和量子力学结合起来。一项名为“来自时空量子纠缠的引力”(GQuEST)的桌面实验将使用一种新型干涉仪来搜索此类理论预测的一种物理效应,这种干涉仪可以记录光子数而不是测量干涉图案。GQuEST团队计算了他们设备的灵敏度,并表明它检测预期信号的速度比传统干涉仪快100倍。

量子化引力意味着时空不是连续的——当观测尺度小到 10^{-35} m的尺度时,时空就会变得“像素化”,这个尺度太小了,无法在任何实验中探测。然而,某些量子引力模型预测,时空可能会波动——时空结构中的一种自发拉伸和挤压现象,



GQuEST的实验设计类似于经典的迈克尔孙干涉仪,激光束(红色)射向分束器并被分成两条路径,两端各有一个反射镜。预期,其中一些光将与量子引力波动相互作用,在输出光中产生调制信号(粉红色)。GQuEST团队计划用镜腔过滤光,并记录以偏移频率发出的光子(蓝色)的数量,而不是在干涉图样中寻找这种调制

可能产生可观察的效应。加州理工学院理论家 Kathryn Zurek 建立了一个名为“像素子(pixelion)”的模型,该模型预测干涉仪内部的集体波动会导致干涉仪输出光中出现可检测的频率变化或调制。

Zurek 和她的同事计划使用 GQuEST 测试这一预测,目前加州理工学院正在构建其初步版本。该实验的基本布局是一个经典的迈克尔孙干涉仪,其中光被分成两条路径,然后重新组合以产生干涉图案。类似激光干涉引力波天文台(LIGO)这样的实验监测干涉图案变化,从而探测引力波信号。然而,这种测量策略对于检测 pixelion 预测的调制并不实用,GQuEST 团队负责人 Lee McCuller 说:“在 LIGO 中,由于散粒噪声,功率不断上下波动,因此很难分辨 pixelion 模型所预期的一点点额外的波动。”

为了寻找量子引力信号,McCuller 团队正在开发一种光子计数干涉仪。其想法是在“边带”频率下测量干涉仪的输出,即从 200 THz 激光频率偏移 17 MHz。边带频率与调幅(AM)无线电信号相似,对应于载波幅度的调制。干涉仪对噪声和其他环境影响的响应类似,但在偏移高达 17 MHz 时产生的边带光的数量通常可以忽略不计。然而,激光光子的频率可能会因与 pixelion 涨落的相互作用而发生显著变化。

该团队选择这个特定的边带频率率与 pixelion 波动的预期峰值保持一致,为了确保检测到的任何光

线都来自 pixelion 效应,研究人员将使用光学腔过滤掉附近的所有频率。如果成功,漏光量应该非常小——该团队估计大约每 12 分钟有一个调制的光子,速率或为 10^{-3} Hz。为了检测如此微弱的信号,研究人员将安装一个超导纳米线传感器,它能够以非常小的暗计数(假信号)率来检测单个光子。

还有其他影响,例如反射镜中的热噪声,可能导致光子从系统中泄漏出来。研究人员计算了他们实验设计的预期噪声水平,发现在检测信号是否存在方面,光子计数干涉仪可以比检测干涉信号偏移的传统干涉仪快100倍。

研究人员目前正在构建一个 1 米尺度的演示实验。如果进展顺利,他们计划建造长为 7 米的全尺度实验。他们还计划建造两个彼此相邻的干涉仪,以便进一步检查背景噪声。

纽约锡拉丘兹大学的引力波专家 Stefan Ballmer 说:“该设计避免了影响传统测量方法的一些量子不确定性限制,但 GQuEST 研究人员在充分过滤其输出方面将面临挑战。”

芝加哥大学的量子计量专家 Aaron Chou 认为,GQuEST 策略将显著提高对小信号的灵敏度,光子计数方法受益于最好的超导纳米线探测器中改进的 10^{-5} Hz 暗计数率。这种低测量噪声使实验者能够专注于减少设备中的其他噪声源。他和 Ballmer 都设想了这种光子计数设备在寻找其他信号方面的应用,例如来自早期宇宙的引力波。

DOI: 10.7693/wl20250509

CSTR: 32040.14.wl20250509